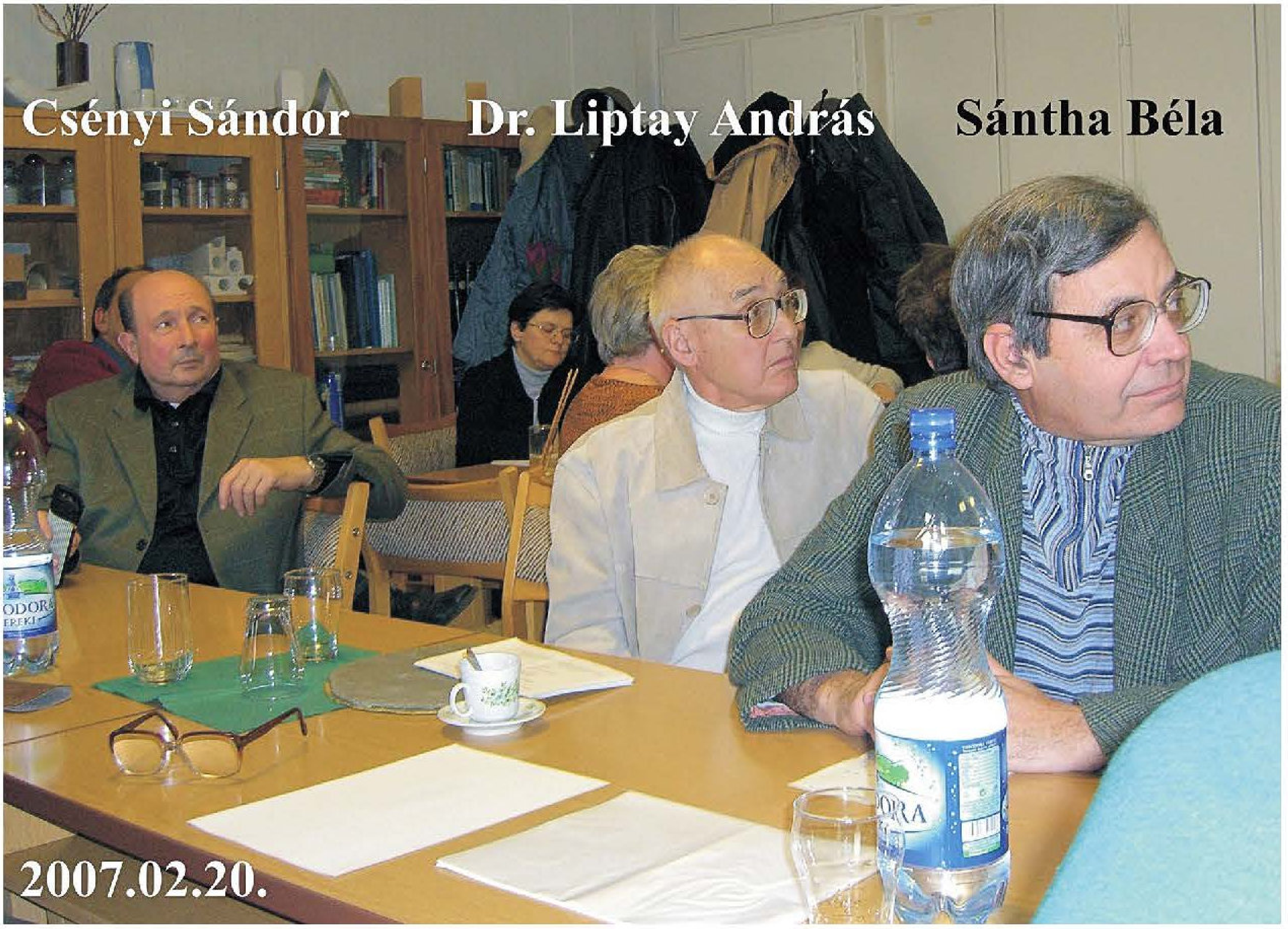
PÁLYATÁRSAK-írásai.

Dr. LIPTAY András (1932-2019): Betonútépítés

Forrás: https://portal.maut.hu/Home/SelectPost/150



Közútépítési betonok szabályozása. **Liptay András** előadása Budapesten, 2007. május 31-én, a Magyar Betonszövetség „A beton minősége” című konferenciáján (*2007. június*)

Betonutak építése és fejlesztése az utóbbi 60 évben Magyarországon. **Liptay András** tanulmánya *(2009. április)*

Betonburkolatok hajlító-húzószilárdságának fáradása ismételt teher hatására. **Liptay András** tanulmánya *(2009. május)*

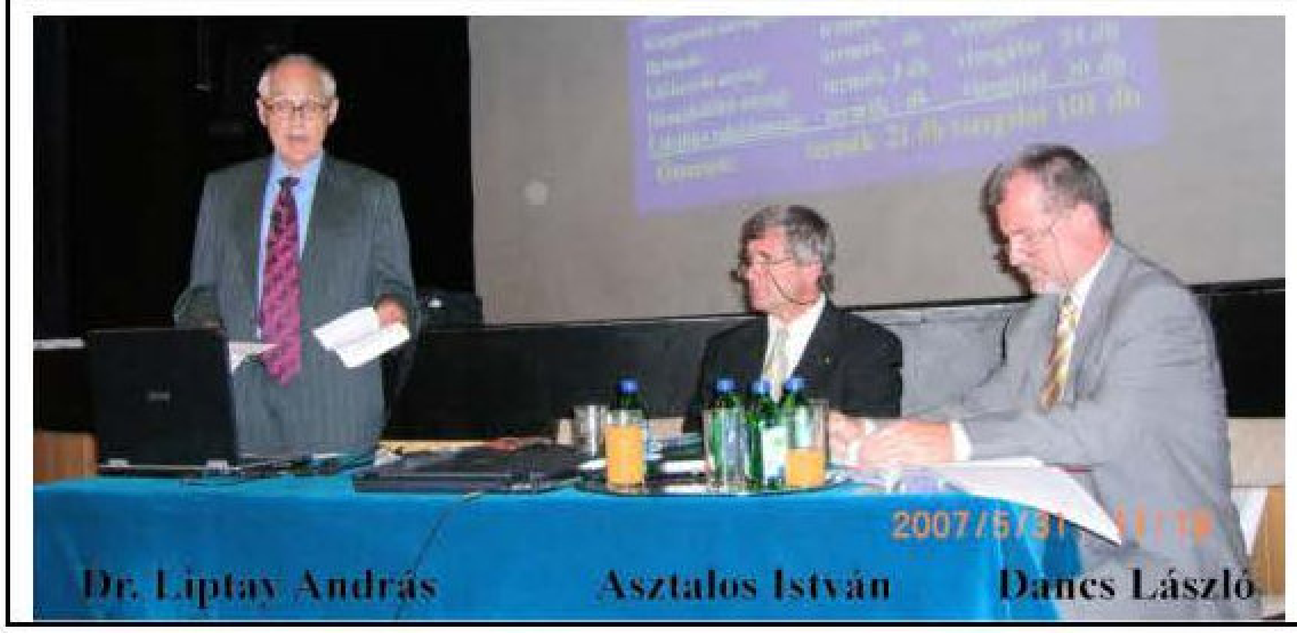
Dr. Liptay András: Hengerelt betonburkolatok. 1. rész. Beton szakmai havilap. 2013. 3-4. szám. pp. 3-6. https://www.betonujsag.hu/userfiles/lapszam/19/pdf/20130304.pdf

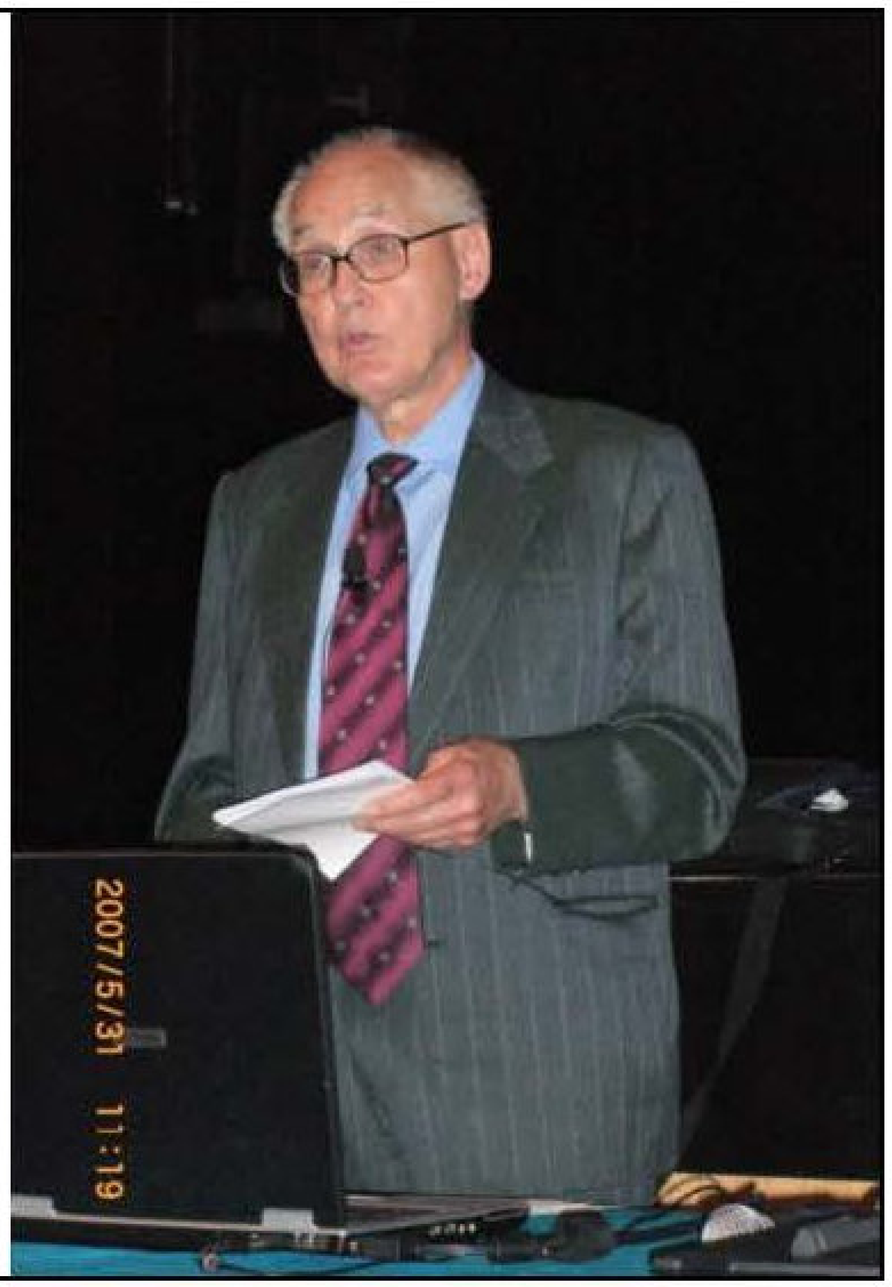
Dr. Liptay András: Hengerelt betonburkolatok. 2. rész. Beton szakmai havilap. 2013. 5-6. szám. pp. 3-7. https://www.betonujsag.hu/userfiles/lapszam/18/pdf/20130506.pdf

KÖZÚTÉPÍTÉSI BETONOK SZABÁLYOZÁSA

DR. LIPTAY ANDRÁS

A Magyar Betonszövetség Budapesten, 2007. május 31-én, „A BETON MINŐSÉGE” címmel rendezett konferenciáján elhangzott előadás





A közutak építése során a pályaszerkezet különböző rétegeihez alkalmazott betonokon kívül számos egyéb, az útépítéshez szorosan kapcsolódó szerkezethez használnak betonokat, például hidakhoz, vízelvezetési rendszerek műtárgyaihoz, átereszekhez, a közúti jelzőtáblák alapozásához és egyéb, az utak használatát, fenntartását kisegítő építményekhez. A jelenlegi ismertetés azonban csak a pályaszerkezeti rétegként épített betonburkolatok szabályozásának jelenlegi helyzetére illetve azon belül is csak a hézagolt betonburkolatokra terjed.

Mielőtt a betonok szabályozásának kérdéseire rátérnék, először fontosnak tartom vizsgálni, hogy a beton burkolatok és alaprétegek építésének várható-e olyan fejlődése, mely az ezirányú műszaki ismereteink fenntartását vagy bővítését indokolttá teheti. A vizsgálható különböző szempontok közül a betonok alkalmazásának indokoltságát az éghajlat változásának várható következményei szempontjából tekintem át.

Az aszfaltburkolatok a hosszantartó nyári hőségben az erős napsugárzás hatására 60 °C hőmérsékletet meghaladóan felmelegednek, ezért rendszeresen előfordul, hogy a termoplasztikus tulajdonságuk és az ismétlődő nehéz kerékterhelés hatására nyomvályúsodnak.

Betonburkolatok esetében a burkolat világosabb színe miatt a felmelegedés kisebb és a melegedés a beton szilárdságát jelentősen nem befolyásolja. Ha a betonburkolat vastagságát és a pályaszerkezetet a nehéz terhelésre megfelelően méretezték, akkor a betonlemez melegebb körülmények között is megfelel. A terhelés ismétlése a betonburkolatot kevésbé veszi igénybe, mint az aszfaltburkolatot.

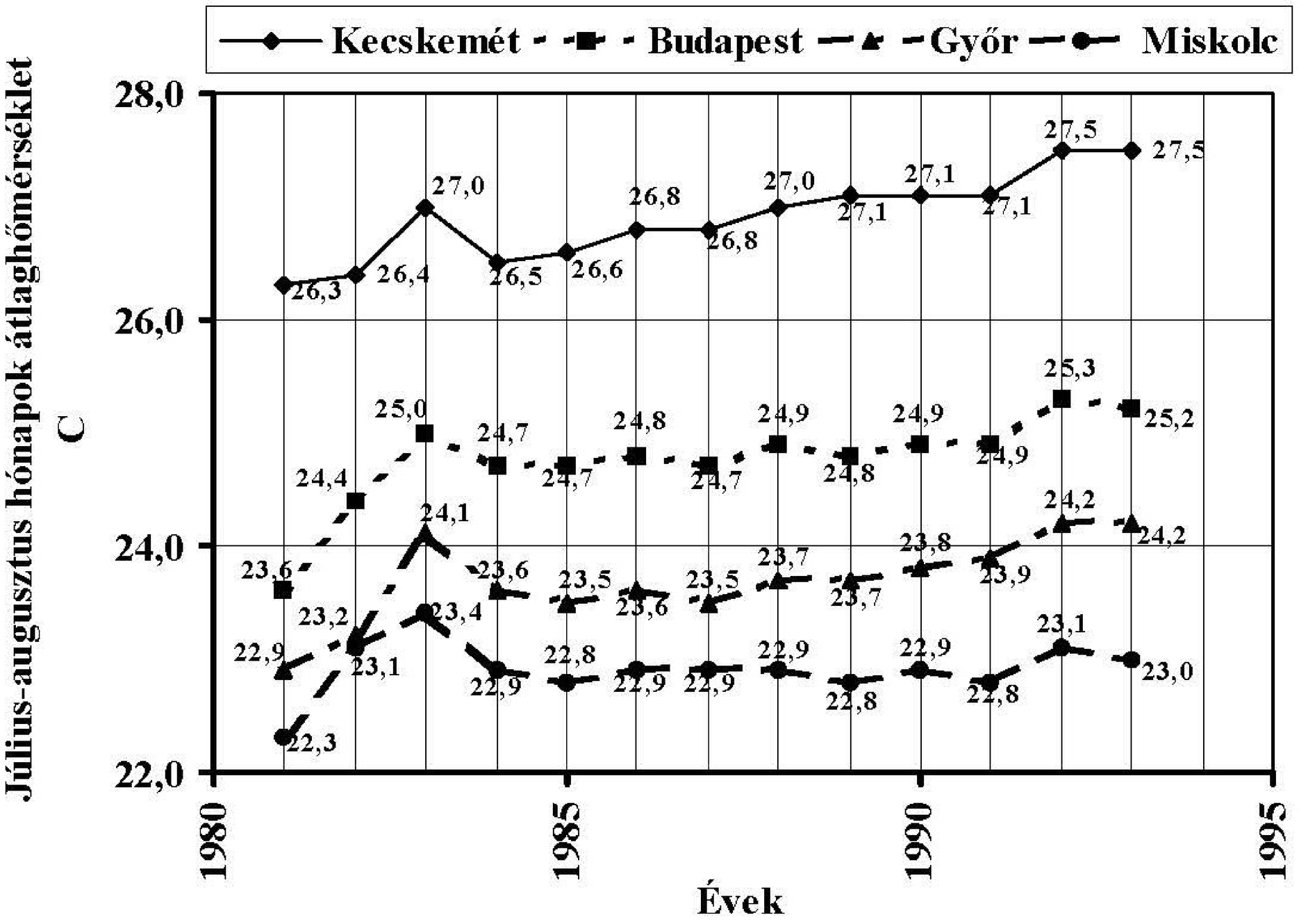
A következőkben ezért azt vizsgálnom, hogy az éghajlati változás, milyen irányú és nagyságú és ennek hatása befolyásolhatja-e a közutak pályaszerkezeti rétegeinek anyagát, azok szükséges tulajdonságait.

1. A KÖRNYEZETI HATÁSOK VÁLTOZÁSA MAGYARORSZÁGON

1994. év őszén az útügyi szervezetek Kecskeméten tartották a szokásos Útügyi Napok rendezvényüket. Ez alkalommal a rendezvényen „Az aszfaltburkolatok nyomvályú-képződési problémái" címmel tartottam előadást [1]. Az előadás témájának, azért választottam a nyomvályú képződést, mert a 80-as évek végétől az aszfaltburkolatokban a nyomvályú-képződése egyre nagyobb gondot okozott. Ebben az időszakban kb. 500 km hosszú útszakaszon alakult ki a forgalom biztonságát veszélyeztető kritikus nyomvályú.

1994-ben az előadásra készülve az Országos Meteorológiai Intézet négy meteorológiai állomásnak, a budapesti, a kecskeméti, a győri és a miskolci mérőállomásoknak a mérési eredményiből 12 év adatait dolgoztam fel és értékeltem azokat a következők szerint:

1981 és 1993 közötti években a két nyári (általában legmelegebb) júliusi és augusztusi hónapnak a talaj 2 cm mélységében mért hőmérsékleti adataiból évente a kéthavi átlagokat számítottam ki. A kéthavi hőmérsékleti átlagokat évenként az **1. ábrán** mutatatom be.



1. ábra: 2 cm mélységben a talaj júliusi és augusztusi átlaghőmérsékletének változása 1981 és 1993 évek között

Az ábrából jól látható, hogy három meteorológiai állomáson a nyári hőmérsékleti átlagok egyértelműen emelkedtek. A miskolci állomás adatai szerint a hőmérséklet stagnálása illetve kismértékű emelkedése figyelhető meg. Az átlaghőmérséklet folyamatos növekedésének következménye, hogy a nyári hőségnapok hőmérséklete és azok hossza növekedett. Ez a jelentős nyári melegedés már lényegesen elősegítette az aszfaltburkolatokban a nyomvályúk kialakulását.

A hőmérséklet emelkedésére az éghajlat megfigyelésével foglalkozó szakemberek már korábban felfigyeltek, de hosszú ideig elég sokan úgy ítélték, hogy ez a melegedés átmeneti jellegű és a tartós melegedés egyáltalán nem biztos.

1988-ban azonban az ENSZ és a Meteorológiai Világszervezet közösen létrehozott egy Kormányközi Testületet az éghajlat változás megfigyelésére illetve a megfigyelt vizsgálati eredmények értékelésére. A Testület a Világ országaiban mért időjárási adatokból és kutatók munkáiból készítenek értékelő jelentéseket, melyekben a tudomány eredményeit összegezik.

- **1990-ben készítették el az első jelentést** és már ebben a jelentésben is szerepelt az emberi beavatkozás hatása az éghajlat változására.

- **1996. évben a második jelentés után fogalmazták meg a kiotói jegyzőkönyvet** a széndioxid kibocsátás –mint az emberi beavatkozás egyik legfőbb forrásának- csökkentésére, melyet 1997-ben sok ország elfogadott, de a legnagyobb széndioxid kibocsátók a mai napig visszautasították a jegyzőkönyv aláírását.

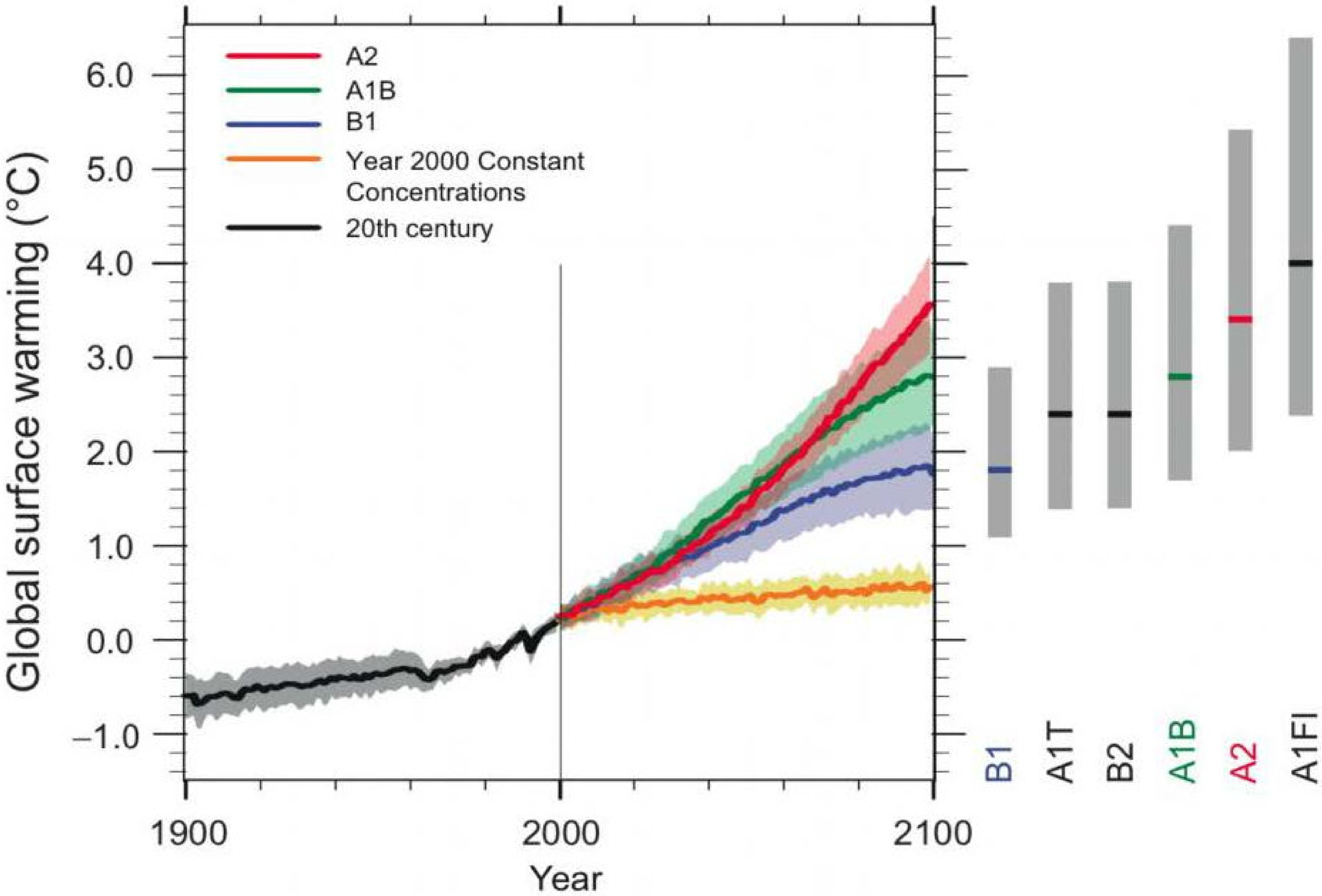
- **2001-ben készült el a harmadik értékelés.** Az értékelés szerint az üvegházhatást előidéző gázok kibocsátását a második értékelő jelentés kisebbre becsülte a várhatónál, ezért a harmadik jelentésben a földfelszín melegedését a korábbihoz képest növelni kellett.
- **A negyedik értékelő jelentést 2007-évben adják ki,** melynek egyes részei már megjelentek [2]. A jelentés kidolgozásában közreműködő I. munkacsoport 2007. február hónapban tette közzé az összefoglalását az éghajlat változásáról [3]. A **2. ábrában** mutatom be a jelentésből a földfelszín melegedéséről a 2000-ig mért, majd ezt követően, 2100. évig a becsült adatokkal készített ábrát. A becsült szakaszban a melegedést különböző befolyásoló feltételekkel vették figyelembe, illetve modellezték. Az ábrában megadott betűjelzések a becsült feltételekre utalnak:

A1FI, A1T, A1B jelzésekben az A1 gyors gazdasági növekedést és a század közepéig a népesség növekedését, majd csökkenését feltételezi. Az A1FI jelölésű görbében a fosszilis tüzelőanyagokra, az A1T jelölésűben a nem fosszilis energiaforrásra, az A1B jelzésűben pedig az energiaforrások közötti egyensúlyra alapozottan becsülték a várható melegedést.

Az A2 jelöléssel régióközpontú gazdasági fejlődét és a népesség számának emelkedését feltételezték.

A B1 görbét a század közepéig a népesség növekedésével, majd ezt követő csökkenésével, a gazdaság gyors szerkezeti átalakulásával, az anyagigény csökkenésével, hatékony technológiák bevezetésével, a fenntartható társadalmi, gazdasági és környezeti feltételekkel tervezték.

A B2 jelöléssel számított melegedésnél a népesség lassú növekedését, a gazdasági fejlődést közepesnek, a technológiai váltást a B1-hez képest lassabbnak, a környezetvédelmet jelentősnek feltételezték.



2. ábra: A földfelszín globális melegedése

A várható melegedésekből arra lehet, illetve arra kell következtetnünk, hogy bármelyik modell következik be, annak hatása Magyarországon, de a Világ többi államában is rendkívül nagy és jelentős (döbbenetes és iszonyatos) lesz.

A Föld felszínének átlaghőmérsékletében 0,1-0,2 °C melegedés Magyarországon a nyári hónapok hőmérsékleti átlagát 1-2 °C -kal növeli. A 2. ábrában bemutatott éghajlat változás a magyarországi nyári hőségperiódusok hosszát és hőmérsékletét lényegesen növelni fogja, ezért már most el kellene határozni, hogy különösen nehéz és rendkívül nehéz forgalmú útszakaszokat, autópályákat betonburkolatú pályaszerkezettel kell építeni, felújítani.

Éppen ezért véleményem szerint a betonburkolatok szerepe a közutak építésében egyre fontosabb lesz és a betonburkolatok építésének fejlődése várhatóan növekedik.

2. A BETONBURKOLATOK ÉPÍTÉSÉNÉL ALKALMAZOTT EURÓPAI SZABVÁNYOK

2000. évtől kezdve az európai szabványok kidolgozása és kiadása felgyorsult és ma már a betonburkolatok építésénél alkalmazni szükséges szabványok majdnem a teljes szakmai területet lefedik.

Az alkalmazni szükséges európai termékszabványokat az **1. táblázatban** foglaltam össze ezek száma 21 db.

1. táblázat: Betonburkolatok építéséhez alkalmazott termékek európai szabványai

Termék		MSZ EN szabvány jelzete	Szabványok száma db
megnevezése	**részletek**		
Betonburkolatok	Anyagok	13877-1	1
	Rendeltetésének megfelelő követelmények	13877-2	1
	Teherátadó acélbetétek	13877-3	1
Cementek	Összetétel, követelmények, megfelelőség	197-1, -2, -4	3
Keverővíz	Mintavétel, vizsgálat, alkalmasság	1008	1
Adalékszerek	Mintavétel, megfelelőség, ellenőrzés	934-2, -4, -6,	3
Kőanyaghalmaz	Adalékanyagok betonhoz	12620	1
	Finom adalékanyag habarcshoz	13139	1
Kiegészítő anyagok	Szilikapor betonhoz, követelmények, megfelelőségi feltételek és értékelés	13263-1, -2	2
	Granulált kohósalak, őrölt	15167-2	1
	Pernye hidraulikus kötőanyagú keverékhez	14227-4	1
Betonok	Műszaki feltételek, megfelelőség	206-1 MSZ 4798-1	2
Hézagkitöltő anyag	Melegen önthető, hidegen bedolgozható és előformázott anyag	14188-1-től –3ig	3
Termékszabványok összesen:			**21**

A vizsgálati szabványokat a **2. táblázat** ismerteti. A betonburkolatok építésével foglalkozó szakembereknek 101 vizsgálati szabvánnyal kell megismerkedniük.

2. táblázat: Betonburkolatok építésénél alkalmazott vizsgálatok európai szabványai

Vizsgálatok		MSZ EN szabvány jelzete	Szabványok száma db
Termék megnevezése	**Vizsgálat**		
Betonburkolatok	Útfelület jellemző tulajdonságainak vizsgálata	13036-1-től –7-ig	4
	Vastagság és rétegek közötti kötési szilárdság vizsgálata	13863-1, -2, -3	3
Cementek	Fizikai és kémiai vizsgálatok	196-1-től –21-ig	11
Adalékszerek	Fizikai és kémiai vizsgálatok	480-1-től –12-ig	9
Köanyaghalmazok (adalékanyagok)	Általános tulajdonság vizsgálata	932-1-től –6-ig	5
	Geometriai tulajdonság vizsgálata	933-1-től –10-ig	10
	Mechanikai és fizikai tulajdonság vizsgálata	1097-1-től –10-ig	10
	Termikus és időálló tulajdonság vizsgálata	1367-1-től –5-ig	5
Friss beton	Mintavétele, vizsgálata	12350-1-től –7-ig	7
Szilárd beton	Vizsgálata	12390-1-től –8	8
	Vizsgálata a szerkezetben	12504-1-től –4-ig (prEN)	4
Utókezelő párazáró anyag	Vízmegtartó képesség vizsgálata	14574-1	1
Hézagkitöltő anyag	Meleg hézagkitöltő anyag vizsgálata	13880-1-től –13-ig	13
	Hideg hézagkitöltő anyag vizsgálata	14187-1-től –9-ig	9
	Hézagkitöltő szalagok vizsgálata	14188-1, -2	2
Vizsgálati szabványok összesen:			**101**

Természetesen nem valószínű, hogy egy konkrét betonburkolat építési feladatnál az *1. táblázatban* felsorolt összes termék tulajdonságára előírt követelményt és a *2. táblázatban* megadott valamennyi vizsgálat pontos módszerét ismerni és használni kell, de a szakemberek felkészültsége ezek előkeresésére és megismerésére feltétlenül szükséges.

Fel kell hívnom a figyelmet arra is, hogy az európai szabványokban előírt vizsgálatok sok esetben azonos nevűek a korábban használt hazai vizsgálatokéval, de a vizsgálat módszerében, eszközében, az eredmények értékelésében legtöbbször eltérnek az általunk használtaktól és megszokottaktól.

3. A BETON PÁLYABURKOLATOK ÉPÍTÉSÉNEK ÚTÜGYI MŰSZAKI ELŐÍRÁSA

A betonburkolatok európai szabványsorozata [4] [5] [6] közvetlen alkalmazásra alkalmatlan, mert különböző követelményszinteket és vizsgálati gyakoriságot ír elő és több olyan előírás hiányzik a szabványból, melyek a beton pályaburkolatok használata szempontjából fontosak pl. a felületi tulajdonságok. Ezekre vonatkozó részletes előírásokat az európai szabvány a nemzeti szabályozás körébe utalja.

A betonburkolatok építésére az ÚT 2-3.201 útügyi műszaki előírást [7] ezért dolgozták át és adták ki 2006. évben. A műszaki előírás a következő témákra terjed:

- Betonburkolatok szerkezeti kialakítása
- Burkolati beton követelményei és összetétele
- Építési előírások
- Betonburkolat minőségi követelményei
- Vizsgálatok módszere, gyakorisága
- Betonburkolat minősítése

A betonburkolatok szerkezeti kialakítása a tervezési feladatok körébe tartozik, az építési előírások között csak azért szerepel, mert a betonburkolatú pályaszerkezet méretezését az ÚT 2-3.211 műszaki előírás megadja ugyan, de tervezési követelményeket az előírás nem tartalmaz. Ebben az előadásban a szerkezeti kialakítás kérdéseivel nem foglalkozom.

3.1. Pályabetonok minőségi követelményei és összetétele

A pályabeton összetételének tervezéséhez ismerni kell azokat a tulajdonságokat, melyekkel a betonnak rendelkeznie kell ahhoz, hogy a tervezett élettartam végéig a burkolat megfeleljen. Az útügyi műszaki előírás továbbra is megtartotta a pályaburkolati betonok korábbi jelölését a CP betűkkel és három húzószilárdsági osztályt különböztetnek meg.

Pályabetonok szilárdsága

A pályaburkolati betonok szilárdsági osztályok szerinti követelményeit a **3. táblázat** foglalja össze. A táblázat a betonok szilárdságainak előírt jellemző értékét adja meg.

3. táblázat: Pályaburkolati betonok szilárdsági osztályok szerint előírt jellemző szilárdsági követelményei

Sor-szám	Megnevezés	Jelölés MSZ EN szerint	CP4/2,7	CP3,5/2,4	CP 3/2
			jelű betonok előírt jellemző szilárdsága (N/mm^2)		
1	Hajlító-húzószilárdság gerendán, 28 napos	F	4	3,5	3
2	Hasító-húzószilárdság készített hengeren	S	3	2,7	2,4
3	Nyomószilárdság 28 napos, kockán	C	37	30	25
4	Hasító-húzószilárdság 28 napos, kifúrt hengeren	SC	2,7	2,4	2,0
5	Nyomószilárdság, 28 napos, kifúrt hengeren	CC	30	25	20

Megjegyzés: *Az 1., 2., 3. sorszámnál a táblázat a keverőtelepen vett mintából készített próbatestek vizsgálati eredményeire előírt követelményeket adja meg, a 4.és 5. sorban előírt szilárdságok a burkolatba beépített betonra vonatkoznak. A 2,. 3. és 4. sorban előírt követelmények az alkalmassági vizsgálat alkalmával készített próbatestekre írja elő a követelményeket.*

Pályabeton fagy- és olvasztó sózásállósága

A beton fagyállóságának és jégolvasztó sózás-állóságának biztosításához a betonba légbuborékokat kell bekeverni és a buborékok eloszlása a betonban olyan kell legyen, hogy a megszilárdult betonban MSZ EN 480-11 szerint mikroszkóppal mérve a buborékok távolsági tényezője (t) az alábbi kell legyen: ***t ≤ 0,22 mm***

Megjegyzés: *Ha korábbi tapasztalat a friss beton légtartalma és a távolsági tényező közötti összefüggésre nem áll rendelkezésre, akkor a műszaki előírás első közelítéseként a* ***4. táblázat*** *szerinti légtartalmat ajánlja.*

4. táblázat: A távolsági tényező eléréséhez ajánlott friss beton légtartalom

Legnagyobb szemnagyság [mm]	**Friss beton levegőtartalma térfogat [%]**
8	6,0
16	5,5
22	5,0
32	4,5

Pályabeton tömörsége a burkolatban

A korábbi előírásokhoz képest új előírás, melyet az európai szabványból vettünk át, hogy a burkolatba beépített pályabeton tömörségét a kifúrt minták vízzel telített testsűrűségéből kell ugyanabból a keverékből készített próbatestek vízzel telített testsűrűségéhez hasonlítva meghatározni és minősíteni. A burkolatba bedolgozott beton tömörsége: ≥95% legyen.

Pályabeton összetétele

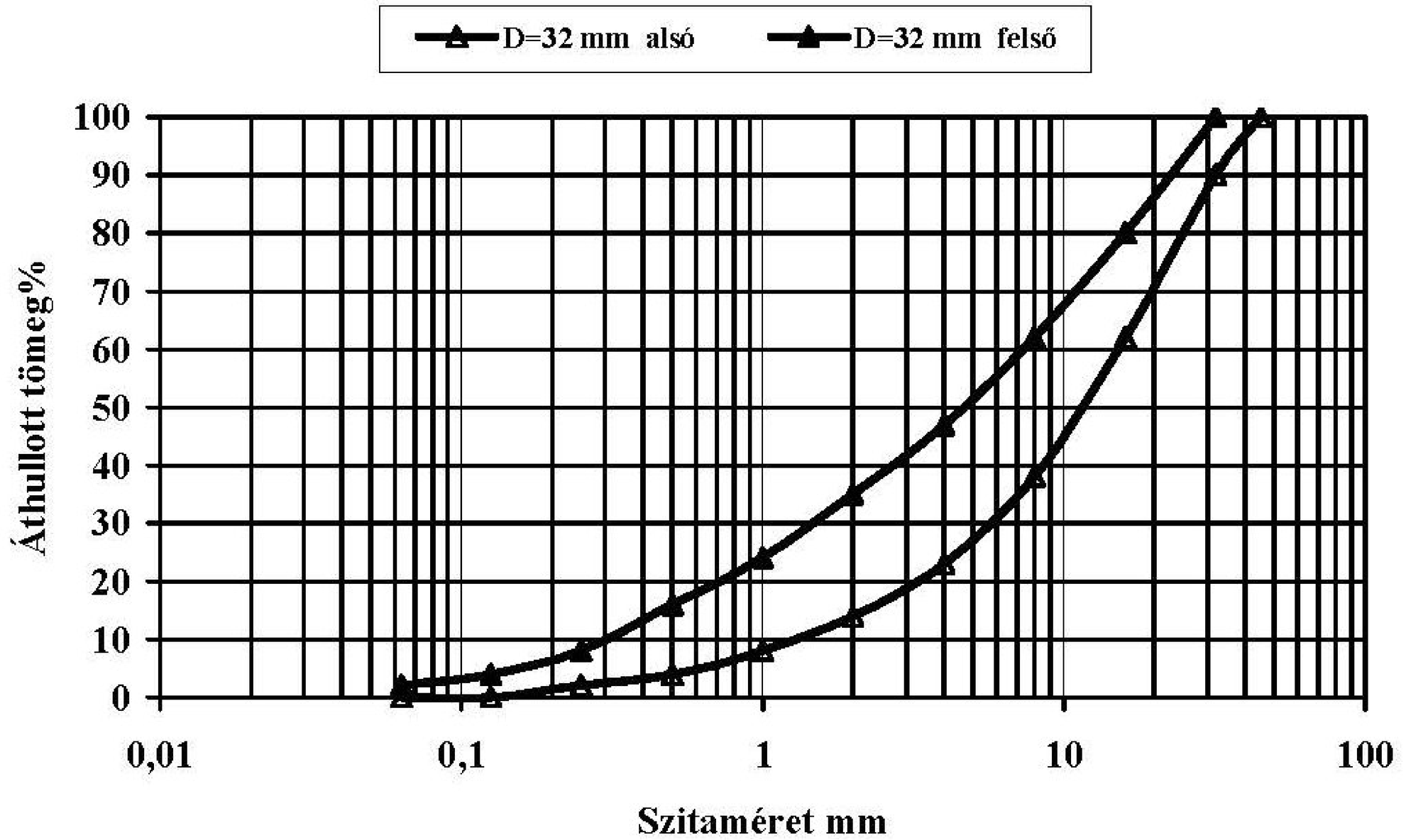
A beton összetételét a várható szilárdságra kell tervezni, ez a szilárdsági eredmények középértékéhez közeli szilárdságot jelenti. Ha a gyártó a tervezett összetételű betont még nem gyártotta és ezért, a szilárdságok szórását nem ismeri, akkor a beton összetételének tervezéséhez a várható szilárdságok becsült értékét, az útügyi műszaki előírás az **5. táblázat** szerint adja meg. A műszaki előírás a pályabeton anyagainak összetételére alapvető követelményeket (a beton legkisebb cementtartalmát, a víz-cement tényező felső határértékét, az adalékanyagok zúzott anyagrészére előírt legkisebb mennyiséget) ír elő (lásd 5. táblázat).

5. táblázat: A burkolati betonok összetételének követelményei

Megnevezés	**CP4/2,7**	**CP3,5/2,4**	**CP 3/2**
	jelű pályaburkolati beton		
Hajlító-húzószilárdság 28 napos várható értéke [N/mm²]	5,3	4,6	4,0
Hasító-húzószilárdság 28 napos várható értéke [N/mm²]	4,0	3,6	3,2
Nyomószilárdság 28 napos várható értéke kockán [N/mm²]	45	40	33
Nyomószilárdság 28 napos várható értéke hengeren [N/mm²]	40	34	28
Beton cementtartalma* [kg/m³]	≥350	≥330	≥300
Beton víz-cement tényezője	≤0,43	≤0,45	≤0,47
Adalékanyag legnagyobb szemnagysága, D [mm]	8*, 16, 22, 32		
Adalékanyag zúzott részének [8] mennyisége [m%]	≥50	≥40	≥30
Távolsági tényező [mm]	≤0,22		

** Megjegyzés: D = 8 mm keverék cementtartalma ≥ 370 kg/m³ legyen.*

A adalékanyag keverék szemeloszlása, akkor felel meg, ha az útügyi műszaki előírásban a legnagyobb szemnagysághoz tartozó szemeloszlásra megadott határgörbék közötti illetve a finomsági mérőszáma lépcsős szemeloszlásnál a határgörbék finomsági mérőszáma közé esik. A **3. ábra** mutatja a leggyakrabban használt D=32 mm legnagyobb szemnagyságú adalékanyag keverék szemeloszlására előírt határgörbéket.



3. ábra: 32 mm legnagyobb szemnagyságú szemeloszlásra előírt határgörbék

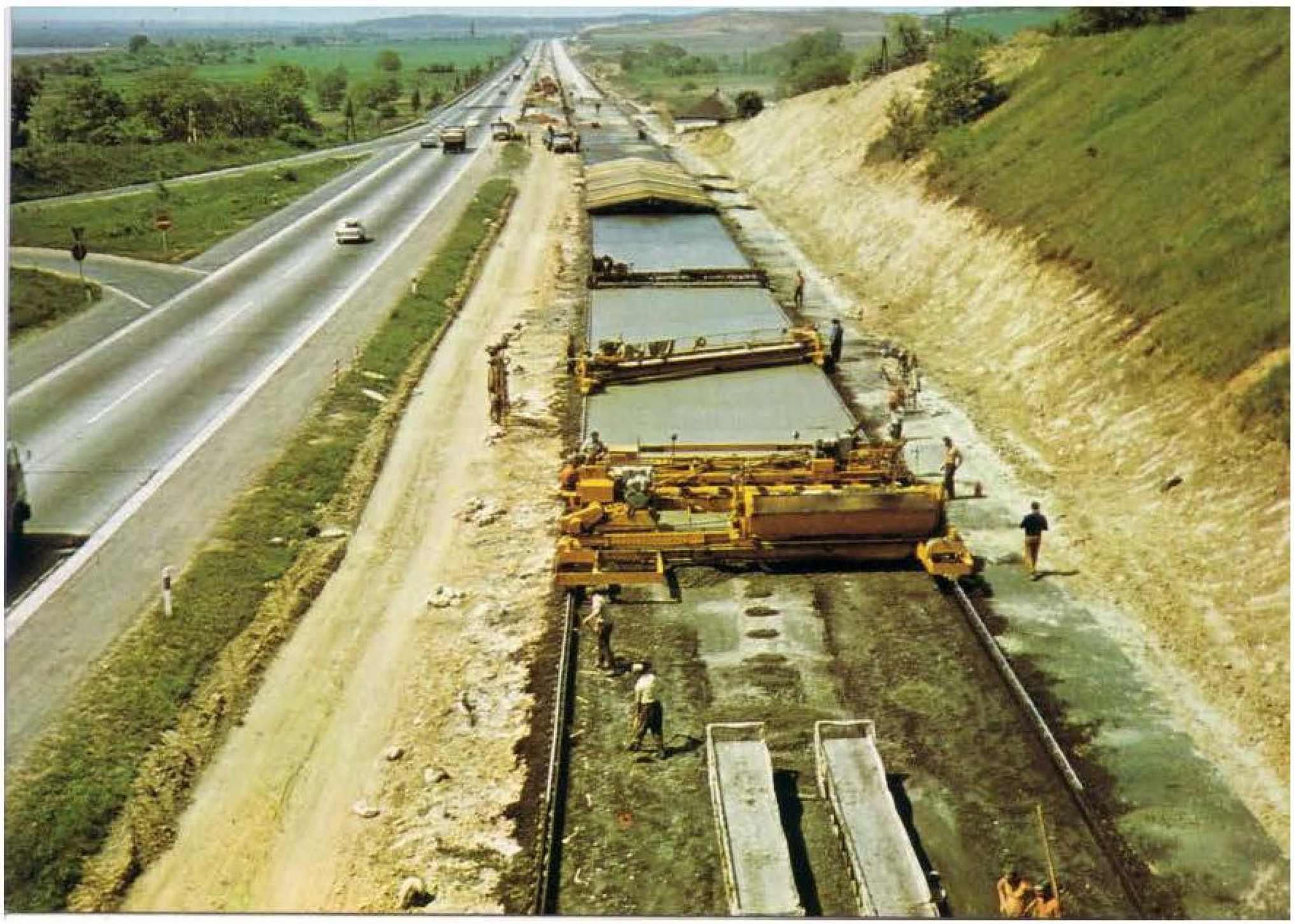
3.2. Pályabetonok szilárségi eredményeinek értékelése

A pályabetonok jellemző szilárdsági eredményeinek értékelését az útügyi műszaki előírás az MSZ EN 206-1 illetve az MSZ 4798-1 szerint írta elő azzal, hogy a hasító-húzószilárdságra előírtakat azonosan alkalmazza a hajlító húzószilárdsági eredmények megfelelőségi feltételeinek meghatározására is.

3.3. Építési előírások

A betonkeverék előállítására, szállítására előírt követelményeket a műszaki előírás melléklete tartalmazza. A beton bedolgozásának módszereit a műszaki előírás ismerteti és a szükséges követelményeket megadja. A csúszózsalus és a formasínes betonozást a **4. és 5. ábrán** mutatom be.

4. ábra: Csúszózsalus betonozás



5. ábra: Formasínek közötti betonburkolat épités 1973.

3.4. A pályabetonok és a burkolatok minőségi követelményei

A pályabetonok minőségi követelményeit a 3.1. fejezet ismertette, a tulajdonságok vizsgálatát és azok jellegét a **6 táblázatban** foglaltuk össze.

6. táblázat: Pályabeton tulajdonságainak vizsgálata

Beton állapota	Vizsgált tulajdonság	Vizsgálat jellege
Friss beton	Testsűrűség Konzisztencia Légtartalom Víz-cement tényező	Gy
Szilárd beton	Hajlító-húzószilárdság (gerendán)	A+M
	Hasító-húzószilárdság (készített és kifúrt hengeren)	A
	Nyomószilárdság (kockán)	A
	Nyomószilárdság (kifúrt hengeren)	M
	Nyomószilárdság eltört gerendavégen	Gy
	Beépített beton tömörsége (kifúrt henger/ készített kocka testsűrűség aránya)	M
	Buborékok eloszlása, távolsági tényező	M

Jelölés: ***Gy*** *= gyártásellenőrző vizsgálat,* ***M*** *= minősítő vizsgálat,* ***A*** *= alkalmassági vizsgálat*

Burkolat tulajdonságaira előírt minőségi követelményeket:

- Burkolatfelületi 1., 2. és 3. osztályra előírt követelmények;
  - burkolat oldalesése (burkolatfelületi osztályra),
  - burkolat felületének egyenletessége,
  - burkolat csatlakozási szinteltérése,
- burkolat vastagsága,
- burkolat szintmagassága,
- burkolat szélessége,
- burkolaton megjelent repedések száma,
- burkolatfelület érdessége (1., 2. 3. és 4. érdességi szintre).

A **7. táblázat** a burkolatfelületi osztálynak megfelelő követelményeket adja meg az oldalesésre, a felület egyenletességére és a csatlakozási szinteltérésre előírt követelmények alapján.

7. táblázat: Burkolatfelületi osztályokra előírt minőségi követelmények

Burkolatfelületi osztályra előírt követelmények megnevezése	1.	2.	3.
	burkolatfelületi osztályban megengedett eltérés		
Burkolat oldalesése: előírt értéke a terv szerint %	± 0,20	± 0,30	± 0,40
Burkolat felületi egyenletessége			
ÚT-02-vel mért összegezett grafikus elmozdulás cm/100m	12,5	13	14
Legnagyobb elmozdulás osztályköze mm	12 - 15		
Legnagyobb osztályközbe eső mérés száma db/km	2	3	4
Hullámmérő léccel mért egyenletességi követelmény			
3 m-es léc alatt mért hullámmagasság mm	3	5	7
A mért értékek legfeljebb 7%-a lehet nagyobb a megadott értéknél legfeljebb 2 mm-rel			
Csatlakozási szinteltérés			
Kereszthézagnál legfeljebb mm	3	4	5
Hosszhézagnál legfeljebb mm	5	6	7

A burkolat vastagságára, szintmagasságára, szélességére, a repedések számára és a burkolatfelület érdességre előírt követelményeket a **8. táblázat** foglalja össze.

8. táblázat: Betonburkolatra előírt minőségi követelmények

Burkolat tulajdonsága	Előírt érték	Megengedett eltérés
Vastagság	Terv szerint	-10 mm
Szintmagasság	Terv szerint	± 20 mm
Szélesség	Terv szerint	- 50 mm
Repedések száma	0 db	Betontáblák számának 2%-a
Érdesség mélysége (homokmélység)		
1. érdességi szint	≥ 0,5 mm	A követelménynél kisebb nem megengedett
2. érdességi szint	≥ 0,4 mm	
3. érdességi szint	≥ 0,3 mm	
4. érdességi szint	Nincs előírt érték	-

3.5. A minősítő vizsgálatok gyakorisága

A minősítő vizsgálatok gyakoriságát a **9. táblázat** foglalja össze.

9. táblázat: Minősítő vizsgálatok gyakorisága

VIZSGÁLAT		
megnevezése	**módszere**	**gyakorisága**
Hajlító-húzószilárdság 28 napos	MSZ EN 12390-5	1/400 m^3
Nyomószilárdság kifúrt hengeren 28 napos	MSZ EN 12390-3	1/5000 m^2
Betonburkolat tömörsége	MSZ EN 13877-2	1/10 ezer m^2
Távolsági tényező a burkolatban	MSZ EN 480-11	1/10 ezer m^2
Vastagság	Magmintán mérve	1/5000 m^2
Szintmagasság	Szintezéssel	Tervezett keresztszelvényekben
Szélesség	Hosszméréssel	
Felület érdessége	MSZ EN 13036-1	Forgalmi sávonként külső, belső keréknyomban 500m-ként
Oldalesés	Szintezéssel	Tervezett keresztszelvényekben.
Felületi egyenletesség	ÚT-02 eszközzel	Forgalmi sávonként az egyik keréknyomban.
Csatlakozási szinteltérés	Tolómérő	Teljes hosszban
Repedések száma	Vizuális	Teljes felületen

3.6. A betonburkolat megfelelősége

A betonburkolat akkor felel meg a követelményeknek, ha a következő tulajdonságok értékelése szerint a minősége megfelelő:a beton hajlító-húzószilárdsága a készített gerendákban és a nyomószilárdsága a kifúrt próbatesteken a követelményeknek megfelelő,

- a szilárd beton buborékeloszlása magmintán mérve a távolsági tényező alapján az előírtnak megfelel,
- a betonburkolat vastagsága a tervezettől legfeljebb a megengedett értékkel tér el,
- a betonburkolat tömörsége a kifúrt magminták és azonos keverékből készített próbatestek vízzel telített térfogatsűrűségének aránya alapján ≥ 95%,
- a felület egyenletessége megfelel az előírt követelménynek,
- a burkolat oldalesése megfelel az előírt követelménynek,
- a burkolatban a repedések száma a betontáblák számának 2%-át nem haladja meg és nincs meg nem engedett (hézaghoz közeli vagy egy táblában több) repedés.

IRODALOM

1. **Dr. Liptay András:** Az aszfaltburkolatok nyomvályúképződési problémái Közlekedés- és mélyépítéstudományi szemle 1995/1

2. **Working Group II Contribution to the Inergovermental Panel on Climet Change Fourth Assessment Report:** Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaption and Volunterability

3. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Inergovermental Panel on Climate Change:** Climate Change 2007: The Physical Science Basis

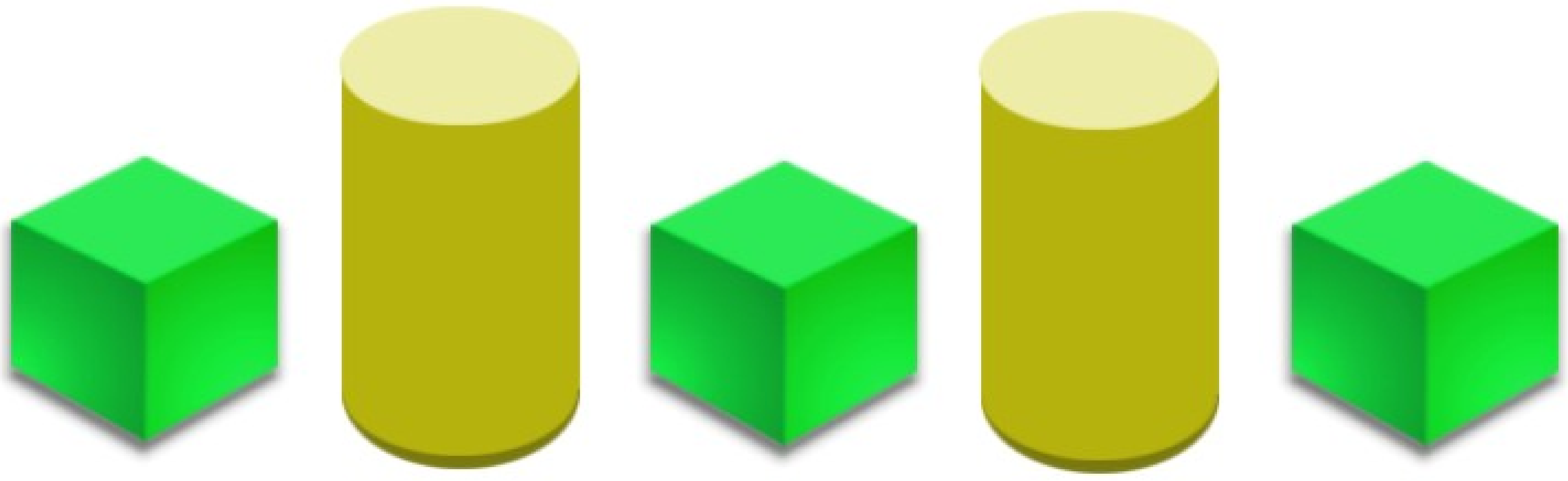
4. **MSZ EN 13877-1: 2005.** Betonburkolatok. 1. rész: Anyagok

5. **MSZ EN 13877-2: 2005.** Betonburkolatok. 2. rész: Betonburkolatok rendeltetésének megfelelő követelményei.

6. **MSZ EN 13877-3: 2005.** Betonburkolatok. 3. rész: Előírások a betonburkolatokban használt teherátadó acélbetétekre.

7. **ÚT 2-3.201: 2006.** Útügyi műszaki előírás: Betonburkolatok építése. Építési előírások, követelmények

8. **ÚT 2-3.601:2006.** Útügyi műszaki előírás: Útépítési zúzottkövek és zúzottkavicsok



DR. LIPTAY ANDRÁS

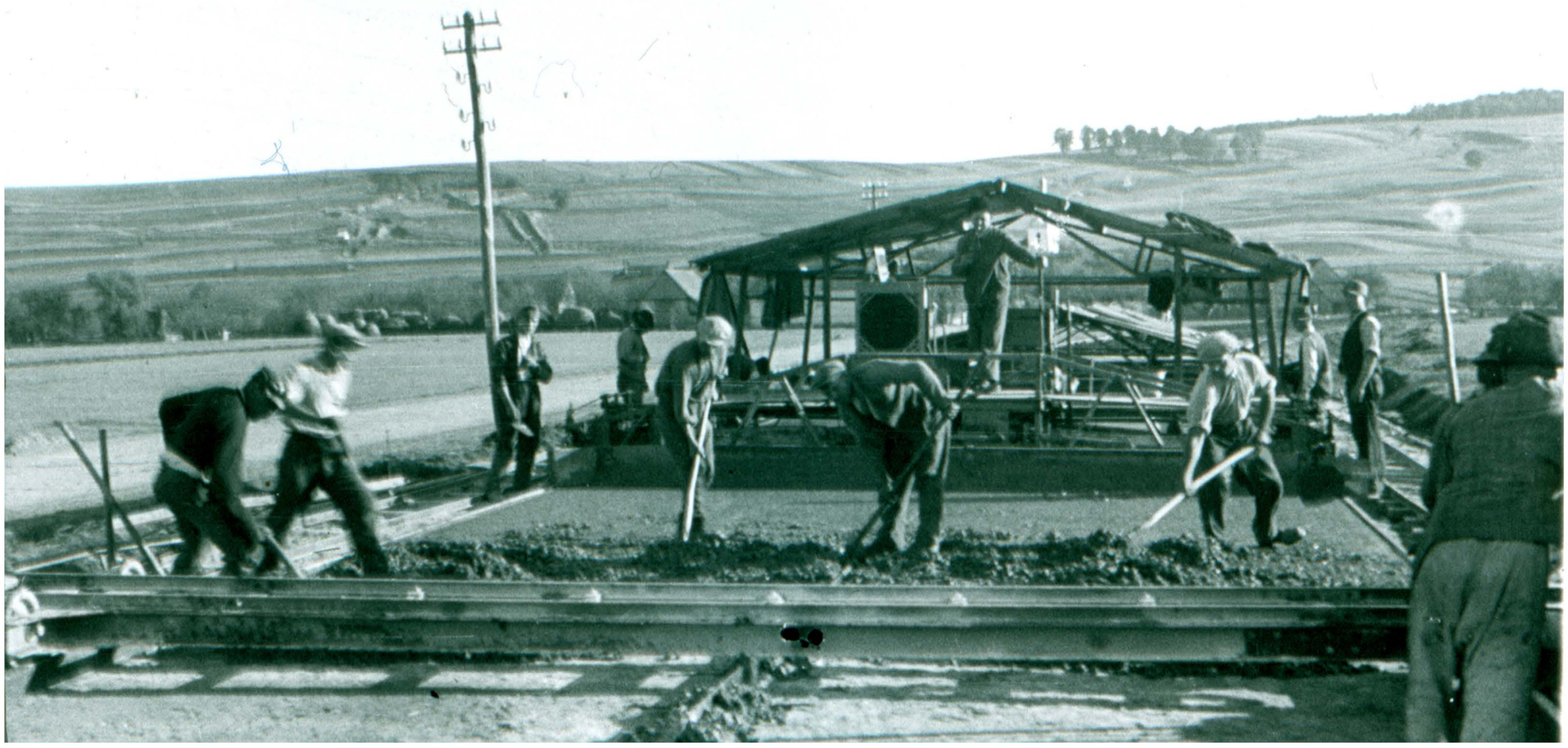
BETONUTAK ÉPÍTÉSE ÉS FEJLESZTÉSE AZ UTÓBBI 60 ÉVBEN MAGYARORSZÁGON

Pályaburkolatok építése 1949 – 1954 évek között

1949-1954 között 459 km betonutat építettek (76 km/év), a burkolatok szélessége 6,5 m vastagsága 18 cm. A betonburkolatot 15-20 cm vastag homokos kavics ágyazatra építették. Kereszthézagokat 8-12 m-ként készítettek és ezeket a hézagokat a burkolat teljes vastagságán átmenő hézagokként alakították ki. Vakhézagokat, tehát olyan hézagokat, melyek a beton teljes vastagságán nem mentek át, – azaz a hézagrést csak a beton felső részén alakították ki – 1952-ben készítettek először 500 m hosszon a 7. számú főúton Balatonszentgyörgy környékén. A 6,5 m széles burkolatot az út fél szélességében hosszhézaggal választották el. A hosszhézagokban a két 3,25 m széles sávot nem kapcsolták össze betonacéllal. Ez azonban legtöbbször azzal járt, hogy a beton hőmérsékleti alakváltozásainak hatására (kiterjedt, majd összehúzódott a beton) a hosszhézagok nagyon megnyíltak. Ezért az 1952-es évtől kezdve a hosszhézagba összekötő vasakat kezdtek helyezni. A betonburkolat oldalfelületét formasínekkel támasztották meg.

Ezt a viszonylag nagy építési feladatot úgy lehetett elvégezni, hogy 1949-ben államosított 11 magán vállalatból szervezték meg a betonutakat építő állami vállalatot (Betonútépítő Vállalat), és megfelelő gépekkel szerelték fel. A magánvállalatok vezetői, szakemberei és még a tulajdonosai is maradtak az állami vállalatnál. Az igazgató és a főmérnök megvédték az embereiket a politikai és az Államvédelmi Hatóságok támadásaitól.

Az *1. ábra* betonozást mutat egy útszakaszon, a beton elterítésén, a felület kialakításán sok fizikai munkát kellett végezni.



1. ábra: Beton terítése kézzel, tömörítés finiserrel

Ebben az időszakban, 1949-1954 között épült meg 11 katonai repülőtér beton pályaburkolata is. A 11 repülőtéri építkezés – a mezőkövesdi katonai repülőtérrel együtt, amelyik 1955-1956 majd 1959-1962 között épült – 880 ezer m^3 beton pályaburkolat építését jelenti. A repülőtéri beton pályaburkolaton kívül betonburkolatok 1958-ig nem épültek.

Betonutak és az M7 autópálya betonburkolatának építése 1958-1975 évek között

1958-1963 között néhány kisebb útszakaszon épültek betonburkolatok, ezek közül a leghosszabb a 21. főút Hatvan – Salgótarján közötti 21 km-es szakasza.

1963. évben kezdődött az M1 – M7 közös bevezető szakaszának, majd folytatólag az M7 baloldali pályájának betonozása. A baloldali pálya megépítése után a jobboldati pálya burkolatának építésére került sor, mely 1975 évben fejeződött be.

1958-1975 között 258 km betonutat építettek (15 km/év), a kezdetben épített útszakaszok szélessége 7 m, vastagsága 18 cm, a burkolat alatt 15-20 cm homokos kavics ágyazatot helyeztek a földmunka tükörre. A kereszthézagok 6 m-ként készültek, ezek vakhézagok, de a hatodik hézag (36 m-ként) terjeszkedési hézagként épült meg. A hosszhézagba összekötő vasakat helyeztek.

2. ábra: M1 – M7 bevezető szakaszának építése Vögele finiserrel

Az 1963-1975 között épült M7 autópálya betonburkolatának a szélessége 1970-ig 7,5 m, attól kezdve 8,5 m. A betonburkolat vastagság kezdetben 20 cm, 1967-től 22 cm-re, 1972-től 24 cm -re változott.

Alapréteg az M1 – M7 közös bevezető szakaszon 15 cm vastagságban zúzottkő és 10 cm vastag itatott makadám, majd a további M7 szakaszon mechanikai stabilizáció + aszfalt, később 15 cm vastag cement stabilizáció és 5 cm vastag aszfalt. Kereszthézagok 6 m-ként vakhézagként készültek, első időszakban még minden hatodik hézag (36 m-ként) terjeszkedési hézag, majd a terjeszkedési hézagok távolságát 60 m-re növelték, később 120 m-ként és 1969-től csak hidaknál készítettek terjeszkedési hézagokat. A hosszhézagokat összekötő betonacélokkal kapcsolták össze.

Az 1960-as évek közepén beszerzett ABG géplánc már terítőgéppel és külön simító finiserrel is rendelkezett. A terítőgépet a *3. ábra*, a finisert a *4. ábra* és a teljes gépláncot az *5. ábra* mutatja.

A betonburkolat oldalfelületét firmasínekkel támasztották meg. A formasínekre felszerelhető kisvasúti síneken közlekedtek a beépítő gépek, a terítőgép, a finiser, a simítógép.

3. ábra: Az M7 autópályán dolgozó betonterítőgép

4. ábra: Az M7 autópályán dolgozó beépítőgép (finiser)

5. ábra: Az M7 autópálya ABG betonozó géplánca

Katonai repülőterek burkolatának felújítása és a Ferihegyi repülőtér betonburkolatainak építése 1975 – 1980 évek között

1975 és 1980 évek között 11 katonai repülőtér betonburkolatát kellett újraburkolni betonnal. A Ferihegyi repülőtér második futópályájának, gurulóút rendszerének és az új forgalmi épület előterének építése is a 1970–es évek végén kezdődött. Az új futópálya és gurulóút rendszerének megépítését követően került sor a régi pályarendszer betonburkolatának átépítésére. Ennek építéséhez új csúszózsalus gépláncot szereztek be és alkalmaztak. A géplánc beépítő gépei autamatikusan vezérlték a szintet és gép előrehaladó mozgásának irányát. A referencia szintet és irányt kifeszített vezérlő huzalról tapogatta le a berendezés. A gépláncot a *6. ábra* mutatja.

Az új beépítő gépláncho z ELBA gyártmányú betonkeverő berendezést is beszereztek. Az ELBA keverőrendszernek nagy előnye, hogy a homok víztartalmát minden keverési adagból vett mintán mérte, és a mért értéknek megfelelően korrigálta az adagolt vízmennyiséget.

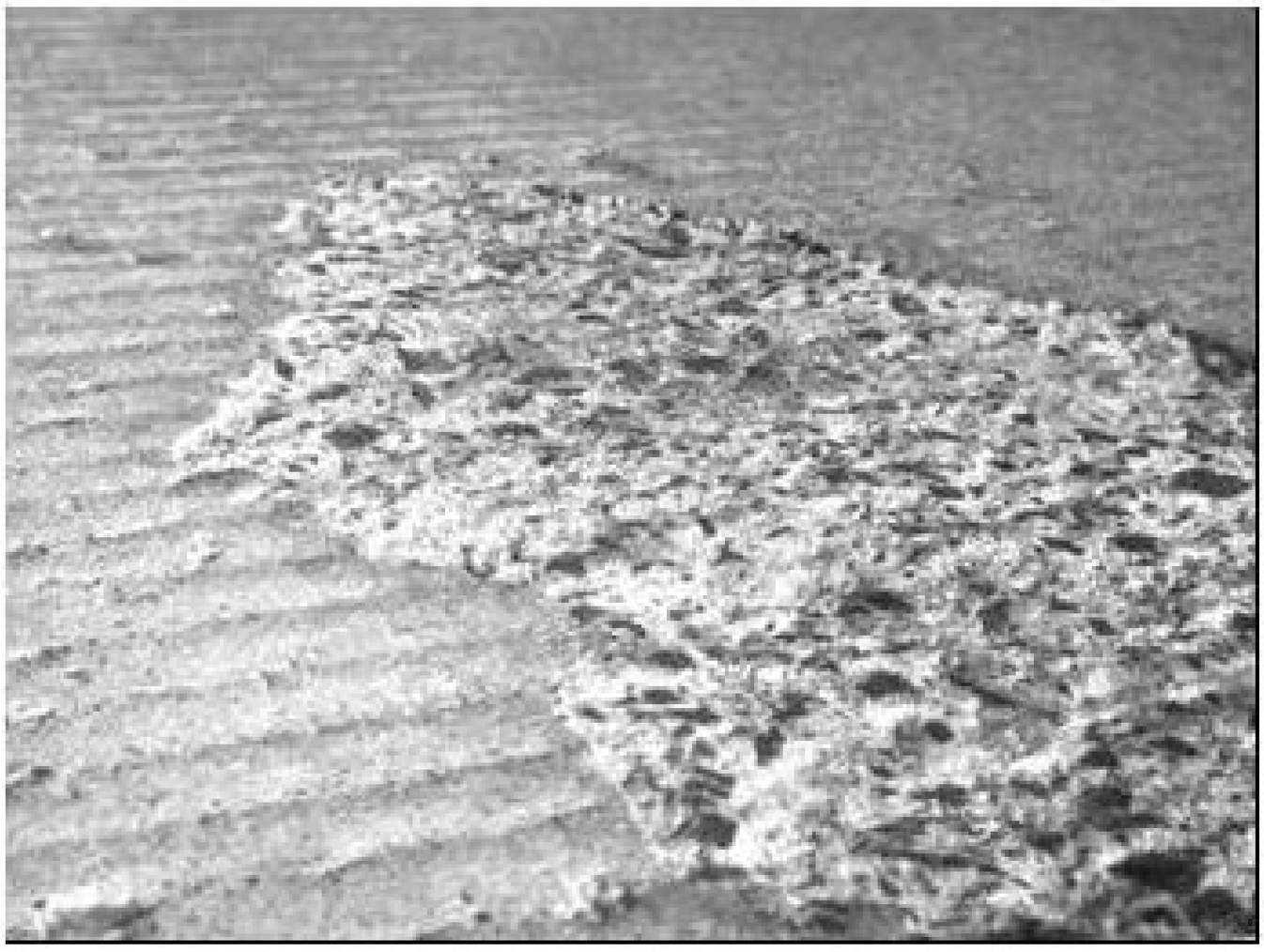
6. ábra: CMI gyártmányú betonozó géplánc a Ferihegyi második futópálya betonozásánál

Az aszfaltburkolatú utak elhatározott kizárólagos építésének okai 1975. év után

1975 után az utak burkolataként betont nem alkalmaztak csak aszfaltot. Ennek fő oka, hogy az 1960-as években Magyarországi utak téli fenntartásánál bevezették a hó-olvasztó sózást.

Az olvasztó sózás hatását, hogy a hó vagy jégréteg olvasztása során az olvadási hőmennyiséget a fizikai folyamat a környezetből veszi át, a szakemberek nem ismerték. Nem tudták, hogy a felolvasztott hó vagy jég mennyiségétől függően a beton felső rétegének hőmérséklete néhány perc alatt (5-10) °C hőmérséklettel csökken.

A téli útfenntartásnál alkalmazott olvasztó sózás az idősebb korú betonburkolatokat lassabban károsította, mint a fiatalabb korúakat. Az M7 autópálya baloldali pályaburkolatán már a második év sózásos hóolvasztása után jelentős felületi károk, lehámlások keletkeztek (lásd *7. ábrát)*. A hibák kivizsgálására elrendelt szakértői véleményben ekkor még azt írta a szakértő, hogy a keverék egyenetlensége okozhatta a felületi károkat.



7. ábra: Téli hó olvasztó sózás által a légbuborékképző adalékszer alkalmazása nélkül készített betonburkolat felületén okozott jellegzetes kár

1960-as évek végén a betonútépítéssel foglalkozó szakemberek már tudták és javasolták, hogy a betonkeveréket légbuborékképző adalékszerrel kell a sózásos fagyasztással szembeni ellenállásra képessé tenni. Az adalékszer alkalmazásának bevezetése több is akadályba ütközött.

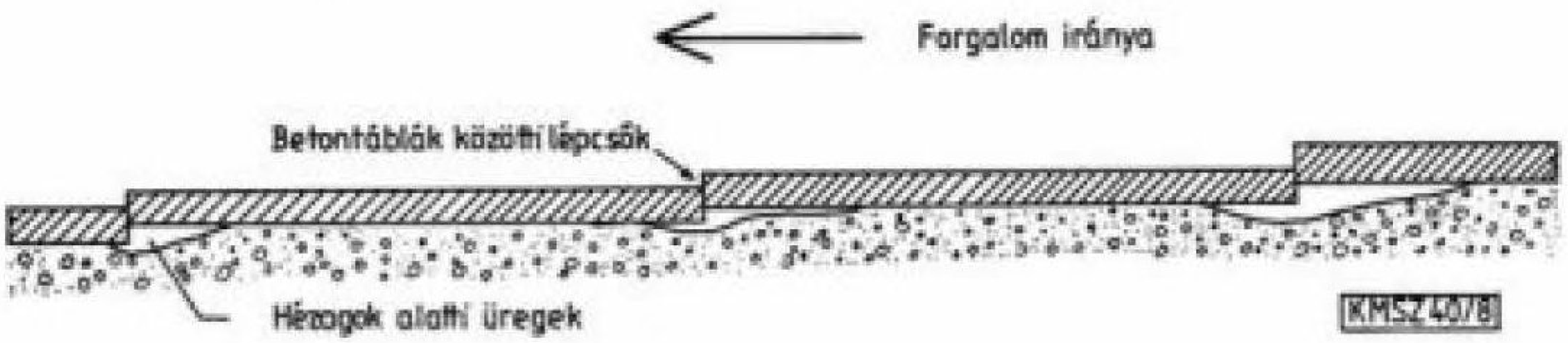
Egyesek, akiknek hozzá kellet járulni a változtatáshoz, nem hittek az érveknek. Ezért 1970. évben kísérleti szakaszt kellett építeni és bizonyítani a megfelelő eredményt.

A következő akadály, hogy az adalékszer alkalmazása költségtöbbletet jelentett. A buborékképző adalékszerek kis mennyisége miatt szerencsére ezt a többletköltséget a kivitelező fel tudta vállalni.

Sokkal nagyobb nehézséget okozott, hogy az építtető szakemberei nem voltak hajlandók elfogadni a légbuborék-tartalom betonba vitele miatti (3-4) %-os nyomószilárdság csökkenést. A kivitelező ennek ellenére az M7 autópálya jobboldali pályájának betonját légbuborékképző adalékszerrel építette meg, csak építés közben nagyon vigyázni kellett, hogy a légtartalom mindig 4 % alatt maradjon, mert különben a kisebb nyomószilárdság miatt, a burkolatot az építtető nem vette volna át. A légbuborék-tartalom megfelelősége nem volt az átadás-átvétel része. Ennek ellenére a hó-olvasztó sózás az M7 autópálya a jobboldali beton pályaburkolatán már nem okozott sérüléseket.

A betonburkolatok helyett az aszfaltburkolatok alkalmazásának másik indoka, hogy a nagy tehergépjármű forgalmú betonutakon a kereszthézagoknál az ismétlődő terhelések hatására lépcsők alakulhatnak ki (lásd *8. ábra*). Ezt az 1960-as évek végén, az 1970-es évek elején már a szakemberek részben tudták, és javasolták a kereszthézagokba teherátadó acélbetétek elhelyezését. Erre azonban az építési költségek növekedése miatt nem kerülhetett sor.

Az M7 autópálya betonburkolatán így alakulhattak ki az átadást követő 10 év elteltével a haladósáv kereszthézagainál a betontáblák között magasságkülönbségek, lépcsők.



8. ábra: Nagy teherforgalom hatására a kereszthézagoknál a betontáblák között magasságkülönbség (lépcső) alakulhat ki

Új kutatások és kísérletek

Az 1970-es, 1980-as években az útbetonokhoz megfelelő tulajdonságú anyagok és a beton legkedvezőbb összetételének meghatározása, valamint a betonburkolatú pályaszerkezetet érő környezeti hatások tárgyában a magyarországi kutató intézetek – a *Közlekedéstudományi Intézet*, a *Budapesti Műszaki Egyetem Építőanyagok, Útépítési, Építőgépek, Vasbetonszerkezetek Tanszékei* és *Laboratóriumai*, valamint a *Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet* különböző osztályai, laboratóriumai, az *Építéstudományi Intézet*, az *Építésügyi Minőségellenőrző Intézet* – a betonburkolatokat kivitelező vállalattal közösen, sőt sok esetben a kivitelező megbízására jelentős kutatásokat végeztek.

A kutatások eredményeként az útbetonokhoz alkalmazható legkedvezőbb anyagok tulajdonságait, összetételét, a pályabetonok összetételének legfontosabb követelményeit és azok határait, valamint a beton pályaburkolatokra vonatkozó követelményeket meg lehetett fogalmazni

Az M0 autópálya betonburkolatának építése napjainkban

A betonburkolatok építésének legújabb fejezete a közelmúltban kezdődött azzal, hogy az M0 autópálya 29+500 – 42+200 km szakasza betonburkolattal épült meg, és 2005. évben forgalomba helyezték. Ennek előzménye, hogy 1994 évben a Kecskeméti Útügyi Napok fő témája az aszfaltok nyomvályúsodási problémája volt. Ott tartott előadásomban sikerült bemutatni, hogy a nyári nagy meleg periódusok – a 15 éves meteorológiai mérési eredmények feldolgozása alapján – egyértelműen bizonyították a hőmérséklet fokozatos emelkedését. Az adatok alapján egyértelműen bizonyítani lehetett, hogy a nagy és erős forgalmi terhelésű utakon az aszfaltok nyomvályúsodásának elkerülése a betonburkolatok alkalmazását szükségessé teszi. Ezt 1994 évtől kezdve többen és többször is elmondtuk, elmondták, leírták. 10 év alatt változott csak meg a szakemberek, illetve a döntést felvállaló vezetők véleménye annyira, hogy az M0 autópályán betonburkolat építését rendelték el.

Ezt követően a 42+200 – 68+700 km szelvények közötti autópálya szakaszon és az M0 körgyűrű 9+400 – 12+500 km szelvények közötti szakaszon, valamint az M6 autópálya 14+000 – 22+336 km közötti szakaszon is 2008. év végére elkészült a betonburkolatú pálya. Jelenleg tehát a betonburkolatú autópálya szakaszok hossza 50,6 km.

A beton útburkolatokat csúszózsalus (*9. ábra*) és formasínes betonozással építik. A nagy forgalmi terhelésű pályaburkolatok betonjának nyomószilárdsági osztálya C30/37, cementtartalma legalább 350 kg/m^3, készítéskori víz-cement tényezője ≤ 0,43, a durva adalékanyagban a zúzottkő részaránya legalább 50 tömeg%. A beton útburkolatok állapotát friss betonba adalékszerrel bevitt légbuborékokkal védik a téli fagy- és olvasztósó-hatástól.

9. ábra: Beton pályaburkolat építése csúszózsalus módszerrel

Az ÚT 2-3.201:2000 és az azt felváltó ÚT 2-3.201:2006 útügyi műszaki előírásban is lehetőséget biztosítottunk a betonburkolat két rétegben történő építésére is, mert ezzel lehetőség nyílna a jelenleg legjobb típusú burkolat készítésére, melynek felső finom szemnagyságú betonját a bedolgozást követően kötéskésleltetővel permetezik, és másnap a meg nem kötött cementhabarcsot vizes sepréssel eltávolítják. Ezáltal érdes felületet kapunk és a gördülési zajhatás ezen a felületen a legkisebb. Az ausztriai A1 autópályán készített kétrétegű betonburkolat kimosással érdesített finom szemű felületét a *10. ábra* mutatja.

10. ábra: Finom szemnagyságú felső betonréteg kimosással érdesített felülete az osztrák A1 autópályán

Betonburkolatok minőségi követelményei

1950-es évek elején még az 1936 évben kiadott Vállalat Feltételek voltak érvényben. Betonútpályák építésére kiadott vállalati feltételekben előírták a cement minőségét és annak ellenőrzését, a homok, zúzalék, zúzottkő szemeloszlásának vizsgálatát, a beton cementtartalmát, a beton próbatestek készítését és a szilárdsági követelményeket.

1952-ben szabványban írták elő a betonburkolat építésének előírásait, követelményeit. 1963. évben adták ki először az Építőipari Kivitelezési Szabályzatot (ÉKSZ), melyet 1971. évben átdolgozva ismét kiadtak. Amíg az ÉKSZ első kiadásában még a munkavégzés módszereire és technológiai műveletekre is megfogalmaztak előírásokat, követelményeket, addig a második átdolgozott kiadásban azt az elvet tartották fontosnak, hogy lehetőleg csak az elkészített szerkezet végső minőségére adjanak előírásokat követelményeket.

1981-ben készült el az MSZ 07-3212 Beton pályaburkolatok című ágazati szabvány, mely felváltotta a betonburkolatokra vonatkozó ÉKSZ-t.

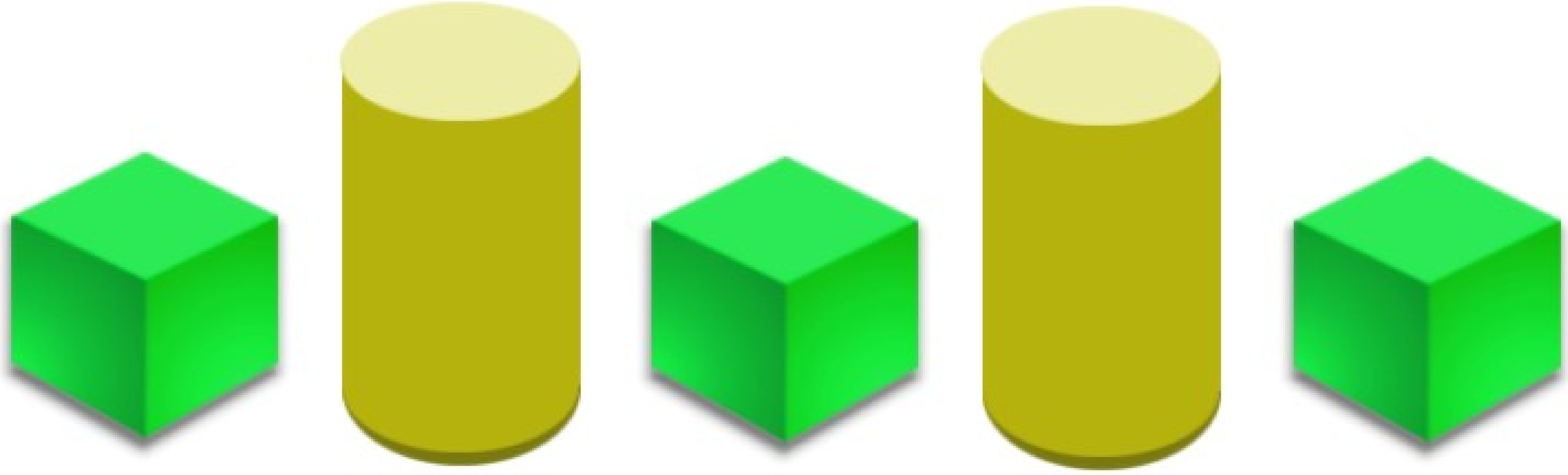
Az ágazati szabvány már részben tartalmazta a kutatások által megfogalmazott eredményeket. Az ágazati szabványok nagy részét, főleg azokat, melyek a munkafolyamatokat szabályozó előírásokat tartalmaztak megszüntették és útügyi műszaki előírásként adták ki. Ez azt is jelentette, hogy az útügyi ágazat területén ezek alkalmazását kötelezően tudták alkalmazni még néhány évig, majd a szerződésekben fogalmazták meg ezek kötelező használatát.

2000. évben adták ki az ÚT 2-3.201 útügyi műszaki előírást, ebben már a kutatásokkal bizonyított eredményeket a követelmények megfogalmazásánál teljes mértékben figyelembe vették.

Ezt az útügyi műszaki előírást 2006. évben dolgozták át és adták ki újból, mivel időközben, 2005. évben megjelent az MSZ EN 13877-1 szabvány a betonburkolat anyagairól, az MSZ EN 13877-2 szabvány a rendeltetésnek megfelelő követelményekről és az MSZ EN 13877-3 szabvány a teherátadó acélbetétekről. A betonburkolatokra vonatkozó három európai szabvány olyan keretszabványnak tekinthető, mely az előírt követelmények széles skálája közül a választást a felhasználóra vagy az alkalmazóra bízza vagy azt írja elő, hogy a helyileg érvényes előírásnak megfelelően kell eljárni. A Magyarországon alkalmazni szükséges követelményeket ezért meg kellett fogalmazni, és ezt az átdolgozott ÚT 2-3.201:2006 útügyi műszaki előírásban adták meg.

Előkészítés alatt áll a szigetelés és aszfaltburkolat nélküli, nagyteljesítőképességű betonból készülő híd-felszerkezetek tervezésének és építésének szabályozása. A hídon átvezetett beton útburkolat a híd tartószerkezetének része, ezért betonacél vasalást kap. A hídon átvezetett vasbeton útburkolat betonjának nyomószilárdsági osztálya C50/60, vízzáróssági osztálya XV3(H)-MSZ 4798-1:2004 (a vízbehatolás mélysége 72 órán át tartó 5 bar víznyomás hatására legfeljebb 20 mm).

Lásd még: http://www.betonopus.hu/notesz/liptay-betonburkolat.pdf



TANULMÁNY

BETONBURKOLATOK HAJLÍTÓ-HÚZÓSZILÁRDSÁGÁNAK FÁRADÁSA ISMÉTELT TERHELÉS HATÁSÁRA

Budapest, 2007. augusztus 5. és szeptember 30. között készült.

Dr. Liptay András
műszaki szakértő

TARTALOM

1. AZ ELSŐ CSOPORTBA TARTOZÓ, LEGNAGYOBB FESZÜLTSÉGTŐL FÜGGŐ FÁRADÁS

1.1. Vesic-Saxena összefüggése a beton húzószilárdságának fáradására

1.2. Michael I. Darter USA által kidolgozott összefüggések

1.2.1. Sawan és Darter által ismertetett fáradási összefüggés (jele: Darter 1.)
1.2.2.Darter 2. második összefüggése szerint
1.2.3.Darter harmadik és negyedik összefüggése

1.3. Belgiumi Útügyi Kutatóintézetben kidolgozott méretezési módszer fáradási összefüggése (egyenlőtlen hőmérséklet eloszlás nélküli eset)

1.4. A pályabeton fáradási tulajdonsága a Portland Cement Association (PCA) USA 1985-ben kidolgozott új méretezési eljárása szerint

1.5. A betonburkolat mértezésénél figyelembe vett fáradási összefüggés Japán-ban

2. MÁSODIK CSOPORTBA TARTOZÓ $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ARÁNYÁVAL KOR-RIGÁLT FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉSEK

2.1. Svéd méretezési módszer szerint

2.2. Belgiumi fáradási összefüggés az egyenlőtlen hőmérséklet eloszlás figyelembe vételével

2.3. A betonburkolatok méretezésének Olaszországban bevezetett módszerénél alkalmazott fáradási összefüggés

2.4. Fáradási összefüggés Spanyolországban

2.5. Kínában alkalmazott fáradási összefüggés

3. A FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉSEK HARMADIK CSOPORTJA $\Delta\sigma/f_{tk}$ ÉS σ_{min}/f_{tk} ARÁNYOK HASZNÁLATÁVAL

3.1. Hollandiában és Dániában alkalmazott fáradási összefüggés

4. **KÜLÖNBÖZŐ FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉS CSOPORTOK EGYÜTTES BEMUTATÁSA**

4.1. Az első csoportba tartozó fáradási összefüggések

4.1.1. Vesic-Saxena összefüggése

4.1.2. Darter fáradási összefüggései

4.1.2.1. Darter 1. módszer

4.1.2.2. Darter 2. módszer

4.1.2.3. Darter 3. lineárisnak nevezett összefüggése

4.1.2.4. Darter 4. exponenciálisnak nevezett összefüggés

4.1.3. Belgiumi Útügyi Kutatóintézet fáradási összefüggése

4.1.4. PCA USA 1985. fáradási összefüggése

4.1.5. Fáradási összefüggés Japánban

4.2. Második csoportba tartozó összefüggések:

4.2.1. Svéd módszer

4.2.2. Belgiumi Útügyi Kutatóintézet fáradási összefüggése

4.2.3.. Domenichini (Olaszország) fáradási összefüggése

4.2.4. Spanyolországban alkalmazott fáradási összefüggés

4.2.5. A kínai összefüggés

4.3. Harmadik csoportba tartozó fáradási összefüggés

4.3.1. Hollandiában és Dániában alkalmazott fáradási összefüggés

4.4. A fáradási összefüggések értékelése

5. JAVASLAT A FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉSRE

5.1. Az első csoportba tartozó összefüggések

5.2. A második csoportba tartozó összefüggések:

5.3. Javaslat

A betonburkolatok ismételt igénybevétel hatására bekövetkező fáradási szilárdságának ismerete a méretezés egyik fontos feltétele. A fáradási szilárdság meghatározására sok vizsgálatot végeztek, legtöbbször laboratóriumban gerenda próbatesteken. Végeztek kísérleteket épített betonburkolatokon is. A laboratóriumi és a helyszíni eredmények alapján sok összefüggést határoztak meg, ezek áttekintését szükségesnek tartom, hogy a hazai méretezésekhez a megfelelő kiválasztását és alkalmazását javasolni lehessen.

A fáradási összefüggések három csoportba sorolhatók, ezek a következők:

- Az első csoportban a legnagyobb igénybevételek együttes hatására kialakult (σ_{max}) feszültség ismételt fellépésének hatásából számítják a szilárdság fáradását.

- A második csoportban a legnagyobb igénybevételek mellett külön figyelembe veszik a legkisebb, az egyenlőtlen hőmérséklet eloszlásból keletkező (σ_{min}) feszültséget is és a $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ arányával módosítják a fáradási összefüggést.

- A harmadik csoportban a legnagyobb és legkisebb feszültség ($\Delta\sigma$) különbségének értéke alapján határozzák meg ismételt igénybevehetőség számát és a legkisebb (σ_{min}) feszültség (f_t) szilárdsághoz viszonyított σ_{min}/f_t arányával módosítják az összefüggést.

A következőkben a fáradási szilárdság meghatározására néhány összefüggést ismertetek a fáradási csoportokba soroltan.

1. AZ ELSŐ CSOPORTBA TARTOZÓ LEGNAGYOBB FESZÜLTSÉGTŐL FÜGGŐ FÁRADÁS

1.1. Vesic-Saxena összefüggése a beton húzószilárdságának fáradására

A beton fáradásának ellenőrzésére a Trans-European North-South Motorway Project (TEM) keretében a betonburkolatokra kidolgozott ajánlásában Vesic-Saxena [1.] képletét adták meg, ez az alábbi:

$$N = (\sigma_{eng}/\sigma_h)^4 * 225000$$

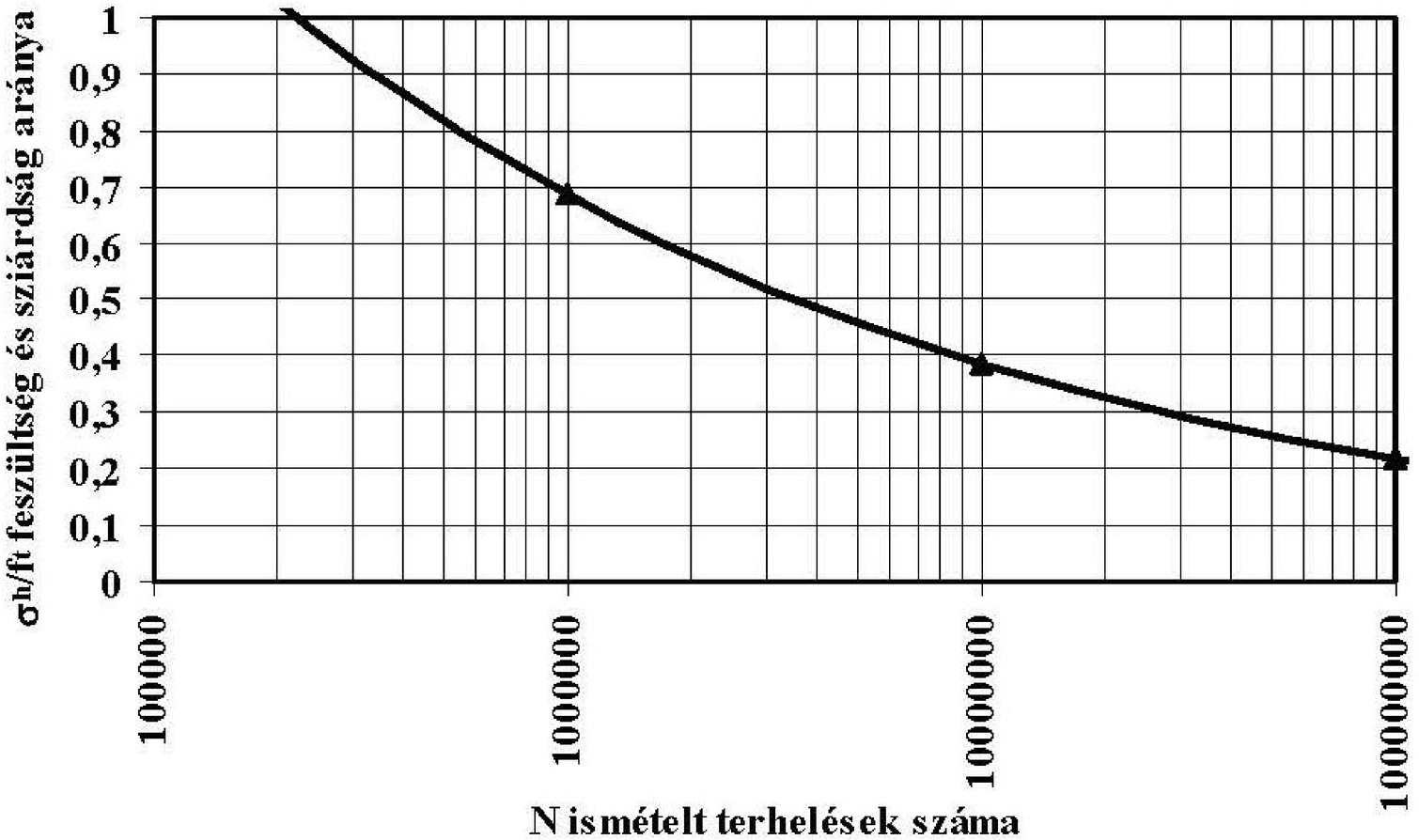
ahol

N	a megengedhető teherismétlések száma,
σ_{eng}	méretezésnél figyelembe vehető hajlító-húzószilárdság 5,0 N/mm^2,
σ_h	a számított hajlító húzófeszültség.

Átalakítva a σ_h/σ_{eng} arány kifejezésére az összefüggés a következő:

$$\sigma_h/\sigma_{eng} = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{N}{225000}}}$$

A teherismétlések számától a σ_h/σ_{eng} a feszültség és szilárdság arányának a függését az **1. ábra** mutatja. Az ábrából jól látható, hogy ez az összefüggés nem a beton húzószilárdságának fáradását jellemzi, ennek ellenére lehet, hogy 10^6 -10^7 teherismétlések közötti tartományban az ismétlések számának meghatározásához még megfelelően használható.



1. ábra Vesic-Saxena szerint a feszültség és szilárdság arányának a függése a teherismétlések számától

1.2. Michael I. Darter USA által kidolgozott összefüggések

1.2.1. Sawan és Darter által ismertetett fáradási összefüggés

Sawan és Darter a fáradási összefüggését a következő [2.] cikkben közölték:
J.S. Sawan, M. I. Darter: Design of Slab Thickness and Joint Spacing for jointed Plain Concrete Pavement
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

Az összefüggést Domenichini is ismertette az alábbi cikkében sok egyéb összefüggéssel együtt [3.]:
Lorenzo Domenichini, Paola di Mascio: Procedure for JPCP Thickhness Design in Italy
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements
Sigüenza – Spain 1990. October 4 – 5

A cikk szerint a hajlító-húzószilárdság fáradási összefüggése az ismételt igénybevétel hatására a következő (a továbbiakban ezt **Darter 1-24%** módszerének jelöljük):

$$\log N = 16{,}61 - 17{,}61 \cdot\cdot SR$$

ahol

SR	σ_{max}/MR	→	a meghibásodás valószínűsége 24 %,
MR	modulus of rupture (Itáliában a húzószilárdság gerendán kétpontos erőterheléssel meghatározva 4,5 MPa),		
N	az ismételt igénybevételek száma.		

A összefüggést átalakítva a σ_{max}/MR arány kifejezésével a következő egyenletet kapjuk:

$$\sigma_{max}/MR = \frac{16{,}61 - \log N}{17{,}61} = 0{,}9432 - 0{,}05678 \cdot \log N$$

Az MR értékét nem 28 napos korban hanem idősebb korra átszámítva is alkalmazzák. Az átszámításra a következő összefüggést adta meg Domenichini:

$$MR(t) = MR(28) * [1{,}22 + 0{,}17*\log t - 0{,}05*(\log t)^2]$$

1.2.2. Darter 2. második összefüggése

Az összefüggést ismertető cikk [4.] a következő:
Michael I. Darter. Concrete Slab VS Beam Fatigue Models
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements 1990.

Darter ebben a cikkben ismertette, hogy az USA-ban 1943. és 1973. között a betonburkolat fáradási összefüggésének meghatározására sok fárasztási kísérletet végeztek.

A vizsgálati eredményekkel számított fáradási összefüggésben a teherátadás miatt 0,75 szorzót alkalmaztak. A gerenda próbatestek ismételt igénybevételével meghatározott fáradási összefüggés a következő:

$$\log N = 17{,}61 - 17{,}61 \cdot (STRESS / FS)$$

ahol

STRESS	húzófeszültség a gerenda alján (psi),
FS	a húzószilárdság gerendán kétpontos erőterheléssel meghatározva (psi),
N	a meghibásodásig az ismételt igénybevételek száma

Az összefüggésből kifejezve a STRESS/FS arányt a következő egyenletet kapjuk:

$$STRESS/FS = \frac{17{,}61 - \log N}{17{,}61} = 1 - 0{,}05678 \cdot \log N$$

Az adatokat három fárasztási kísérlet tanulmányból vették át, melyeknél két erővel terhelt hasáb próbatesteket vizsgáltak.

1.2.3. Darter harmadik és negyedik összefüggése

Ezeket az összefüggéseket is az 1.2.2. szakaszban közölt cikk [4.] tartalmazza. Az előző összefüggések adataitól eltérően a következő összefüggésekhez használt adatok betonlemezeken végzett fárasztó vizsgálat eredményei. A harmadik és negyedik összefüggést tehát betontáblák fárasztó vizsgálatának eredményei. A cikkben közölt adatok azonban csak N = 35000 terhelés ismétlésig terjedtek, ezt meghaladó terhelésismétlés hatása ismeretlen.

Harmadik (Darter 3-50%.) lineárisnak nevezett összefüggés az alábbi:

$$\log N = -0{,}3498 + 2{,}512\,(FS/STRESS)$$

Az összefüggést STRESS/FS arányra kifejezve a következő egyenletet kapjuk:

$$STRESS/FS = \frac{\mathbf{2{,}512}}{\mathbf{\log N - 0{,}3498}}$$

Negyedik (Darter 4-50%.) exponenciálisnak nevezett (ugyanazokra az adatokra vonatkozó) összefüggés a következő:

$$\log N = 2{,}13\,(FS / STRESS)^{1{,}2}$$

ahol

STRESS kritikus hajlító húzófeszültség a betonlemez alján (psi),
FS a húzószilárdság gerendán kétpontos erőterheléssel meghatározva (psi),
N a terhelés ismétlése, a betontáblák törési valószínűsége 50 %.

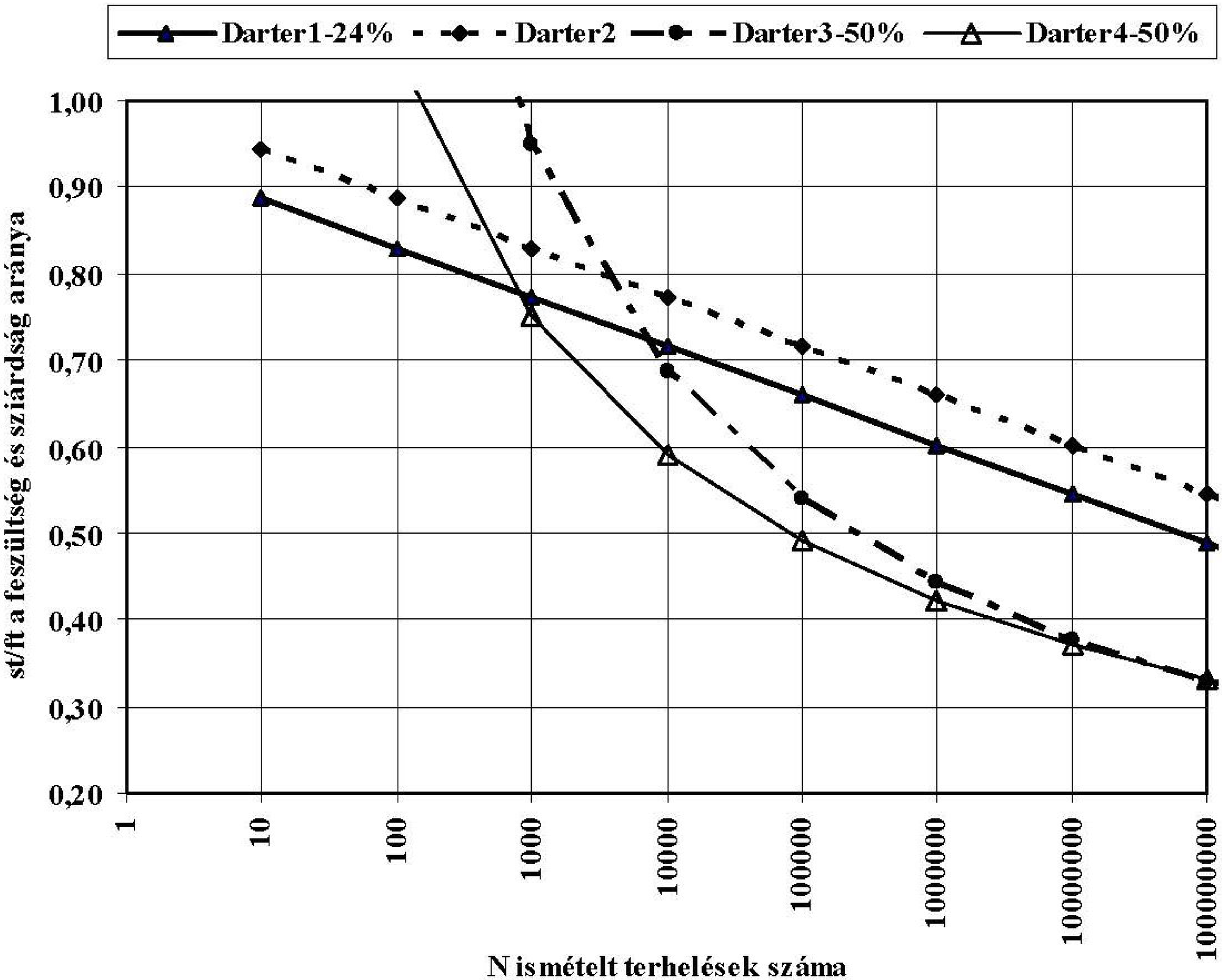
A szerző az exponenciális összefüggést tartja megbízhatóbbnak.

A Darter 4-50%. összefüggésből a STRESS/FS arányt kifejezve, a következő összefüggést kapjuk:

$$STRESS/FS = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt[1{,}2]{\mathbf{0{,}4695}\ \cdot \mathbf{\log\ N}}}$$

Michael I. Darter által kidolgozott összefüggéseket együtt a **2. ábrában** mutatom.

A harmadik (lineáris) és negyedik (exponenciális) összefüggést mintegy 51 eredményből határozták. Az ismétlések száma 35000, ezért. ezeket az összefüggéseket 10^5 –nél nagyobb ismétlések becslésére használni értelmetlen.



2. ábra **Michael I. Darter által kidolgozott terhelésismétlések számának összefüggései a feszültség és a szilárdság arányával**

1.4. Belgiumi Útügyi Kutatóintézetben kidolgozott méretezési módszer fáradási összefüggése (egyenlőtlen hőmérséklet eloszlás nélküli esetben)

A fáradási összefüggést a következő [5.] cikk ismerteti:
VEVERKA V.: The Belgian Road Research Center's Design Procedure for Concrete Pavements
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

A Belgiumi Útügyi Kutatóintézetben kidolgozott és használt fáradási összefüggés a következő:

$$\text{Log } N = 20 - 20 . (\sigma / MR)$$

illetve σ / MR arányra kifejezve:

$$\sigma / MR = 1 - 0{,}05 . \log N$$

ahol
$\sigma = \sigma_p$ ha a betontábla hossza < 6 m,
$\sigma = \sigma_{max}$ ha a betontábla hossza > 6 m,
σ_p a terhelésből keletkező (ismételt terheléssel törést előidéző) feszültség,
$\sigma_{max} = \sigma_p + \sigma_{\Delta t}$ feszültség a forgalmi terhelésből + egyenlőtlen hőmérséklet eloszlásból,
N az ismételt igénybevételek száma,
MR a húzószilárdság.

A méretezésnél azonban csökkentő tényezőt is használnak, mely a betonburkolat törésének illetve meghibásodásának vállalt kockázatát fejezi ki. A méretezéshez a következő összefüggést alkalmazzák:

a) Fáradási tönkremenetel abban az esetben, ha egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból keletkező feszültséget nem kell figyelembe venni (folytatólagosan vasalt betonburkolatnál és hézagolt betonburkolatnál, ha a betontáblák 6 m-nél rövidebbek):

$$\sigma \le \bar{\mathbf{r}} (1-0{,}05 . \log n).X \qquad n = 0{,}25\ N_c$$

b) Fáradási tönkremenetel abban az esetben, ha egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból keletkező feszültséget is számításba kell venni (hézagolt betonburkolatoknál):

$$s \le \bar{\mathbf{r}} (1-0{,}05 . \log n).X \qquad n = \frac{\mathbf{0{,}25 \cdot N_c}}{\mathbf{1000}}$$

Ezt az esetet részletesen a 2.2. szakasz ismerteti!

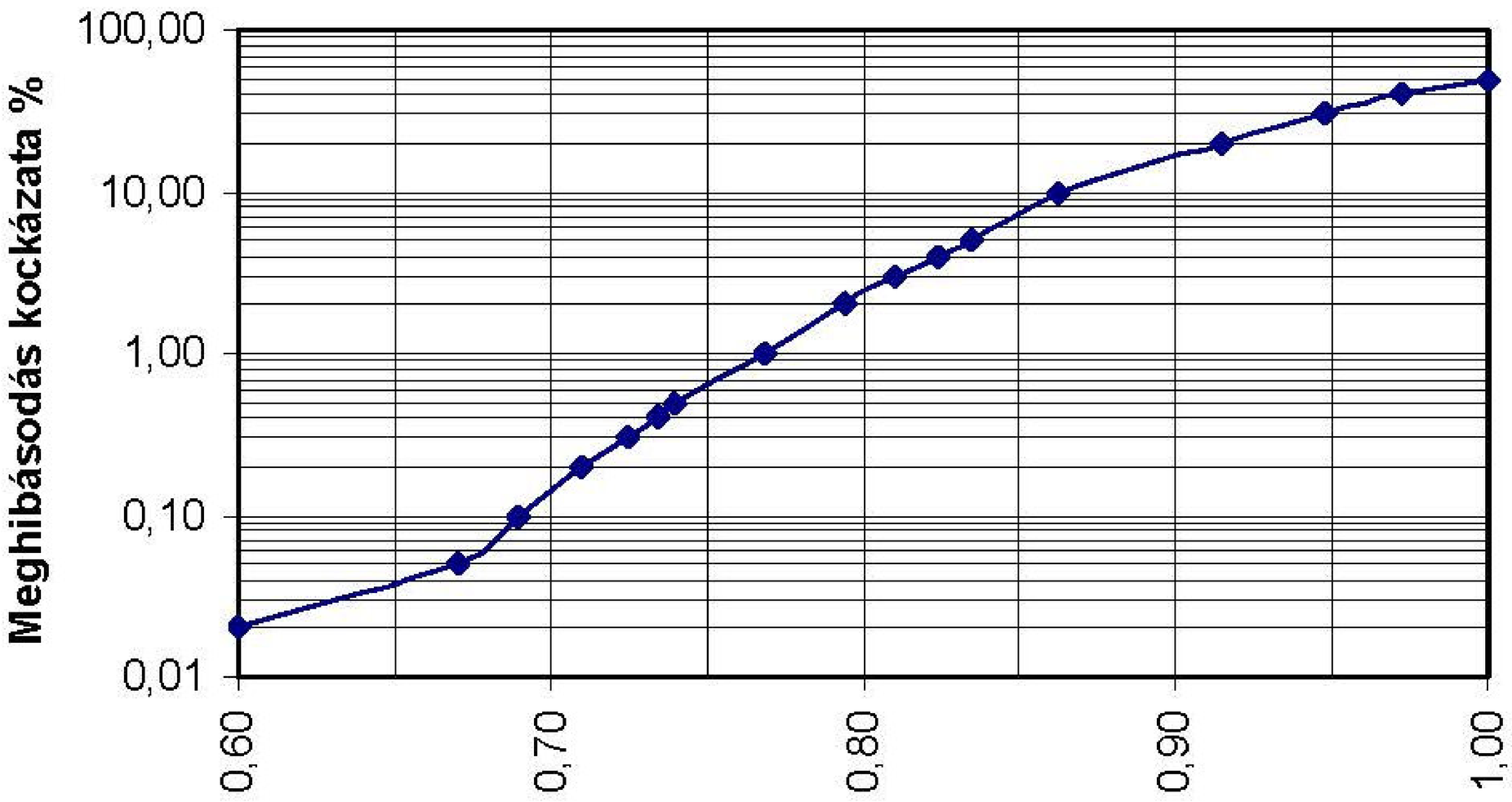
ahol
σ a hasznos terhelés által létrehozott hajlítás húzófeszültsége,
s az összes hajlító-húzófeszültség (a terhelésből létrejött σ feszültség és az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás húzófeszültségének összege),
$\bar{\mathbf{r}}$ a betonburkolat átlagos hajlító húzószilárdsága,

X a meghibásodás vagy törés vállalt kockázata alapján alkalmazott csökkentő tényező a **3. ábrából**,

Nc az egyik irányban a burkolat 40 éves élettartama alatt áthaladó tehergépkocsik száma:

Ha a forgalomra nincs érvényes forgalomszámlálási adat, akkor az alábbi felvett 40 éves forgalmi adattal számolnak:

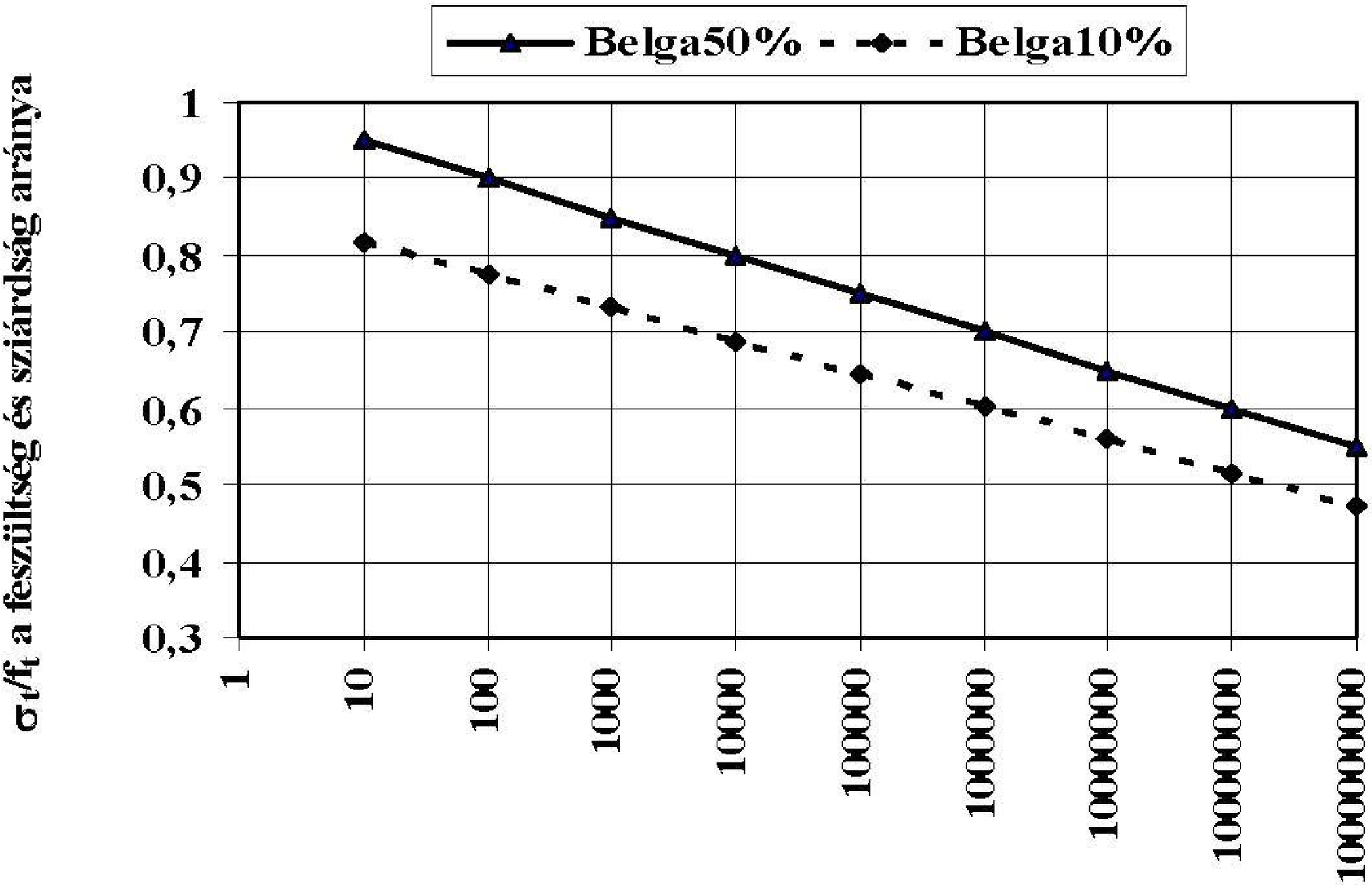
2x3 forgalmi sávval kialakított autópályán	$5{,}4 \cdot 10^7$
2x2, forgalmi sávval kialakított autópályán	$3{,}2 \cdot 10^7$
2x2, forgalmi sávval kialakított elsőrendű főúton	$3{,}2 \cdot 10^7$



3. ábra A meghibásodás illetve táblatörés vállalt kockázatától függően alkalmazható csökkentő tényező

A fáradási összefüggést, abban az esetben, ha az egyenlőtlen hőmérséklet eloszlásból származó feszültséget nem kell figyelembe venni a **4. ábra** mutatja.

Az ábrában két vállalt törési kockázattal adtuk meg a fáradási összefüggést. A Belga50% jelű összefüggésnél a törési kockázat 50 %, a Belga10% jelű összefüggés törési kockázata 10 %.



4. ábra A beton húzószilárdságának fáradási összefüggése Belgiumban

1.4. A pályabeton fáradási tulajdonsága a Portland Cement Association (PCA) USA 1985-ben kidolgozott új méretezési eljárása szerint

A méretezési módszert és a fáradási összefüggést a következő [6.] cikk ismerteti:
Packard R. G., Tayabji S. D.: New PCA Thickness Design Pocedure for Concrete Highway and Street Pavements
3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Prudue 1985

Az ismétlődő igénybevétel hatását a beton húzószilárdságának fáradására a következő összefüggéseket határozták meg:

Ha $\sigma_p/MR > 0{,}55$ akkor az összefüggés;

a) $\log N = 11{,}73 - 12{,}08\ (\sigma_p/MR)$, átalakítva:

$$\sigma_p/MR = \frac{\mathbf{11{,}73 - \log N}}{\mathbf{12{,}08}} = 0{,}971 - 0{,}08278 \cdot \log N$$

ahol,
N a terhelés ismétlések száma,
σ_p az egységtengely hatására kialakuló feszültség,
MR a hajlító húzószilárdság.

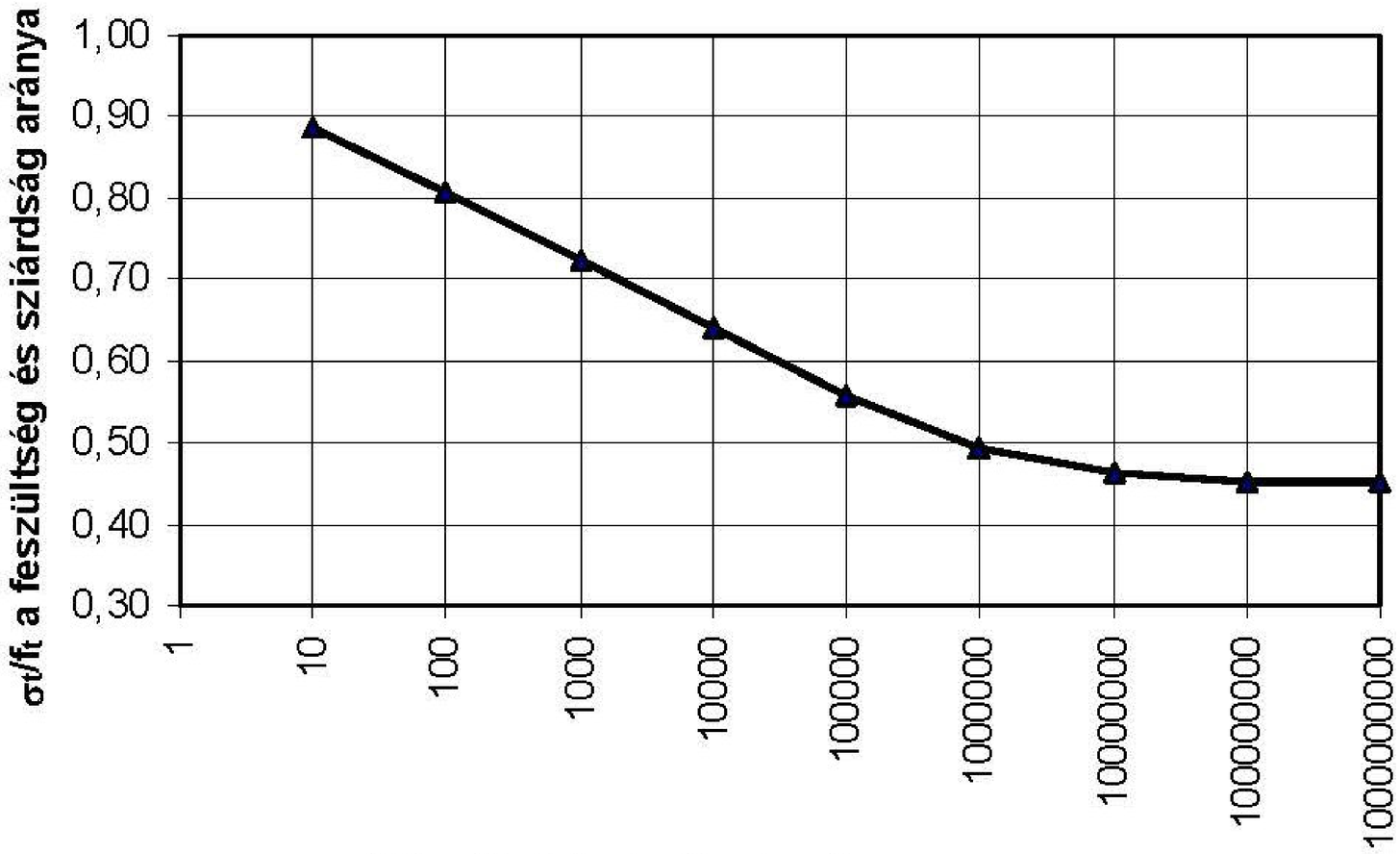
Ha $\sigma_p/MR = 0{,}45$ és $0{,}55$ közötti, akkor az összefüggés;

b) $N = \left[\frac{\mathbf{4{,}2577}}{\mathbf{(\sigma_p / MR) - 0{,}4325}}\right]^{\mathbf{3{,}268}}$ átalakítva: $\sigma_p/MR = 0{,}4325 + \frac{\mathbf{4{,}2577}}{\mathbf{[N]^{\frac{1}{3{,}268}}}}$

Ha $\sigma_p/MR < 0{,}45$, akkor

c) $\log N$ = nincs korlátozva (bármilyen nagy lehet)

Az összefüggést az **5. ábra** mutatja.



5. ábra A beton húzószilárdságának fáradása az ismételt igénybevétel hatására PCA (USA) által kidolgozott összefüggés

1.5. A betonburkolat mértezésénél figyelembe vett fáradási összefüggés Japánban

A Japán módszert az alábbi [7.] cikk ismerteti:
S. IWAMA, T. FKUDA: Design Method and Researches of Concrete Pavements in Japan
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

1985 évben végrehajtott kísérleti útszakaszokon a hajlító húzószilárdság 60 %, 70 %, 80 %, 85%, és 90 % arányának megfelelő feszültséget előidéző ismételt igénybevétellel terhelték a betonburkolatot a szakaszok tönkremeneteléig. A kísérleti eredmények alapján határozták meg a következő fáradási összefüggéseket:

$\log N = 16{,}72 - 16{,}13 * (\sigma_{max}/MR)$ hiba 15 %-os valószínűségének esetén,

$\log N = 20{,}04 - 18{,}52 * (\sigma_{max}/MR)$ hiba 50 %-os valószínűségének esetén.

ahol

σ_{max} a forgalmi terhelés és az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás által létrejövő feszültség,
MR a hajlító-húzószilárdság,
N a terhelésismétlések száma.

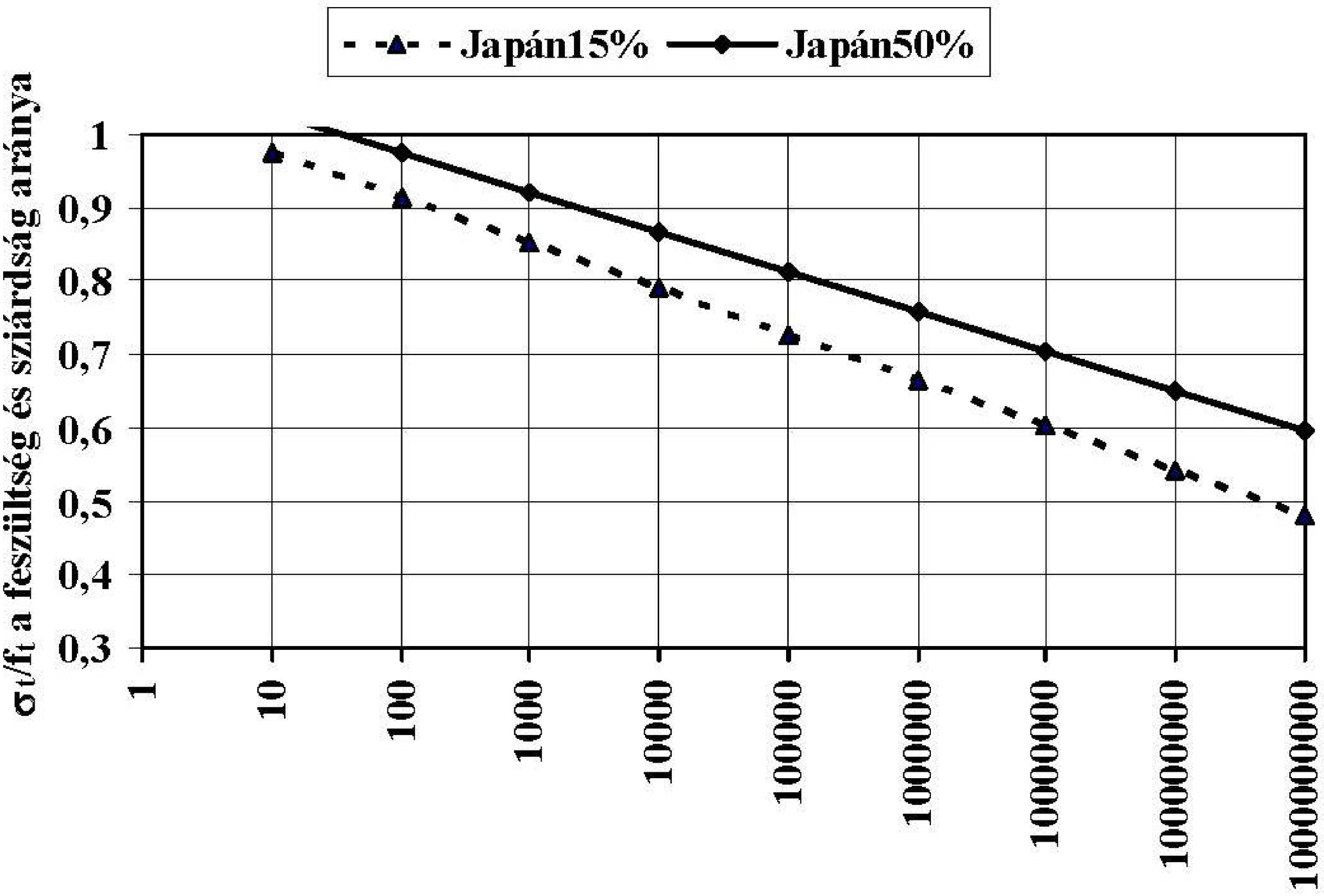
Japánban a cikk szerint a betonburkolatba 3 kg m^2 tömegű acél hálóvasalást helyeznek és ennek hatására kereszthézagokat 25 cm burkolatvastagságig 8 m-ként, ennél vastagabb burkolatoknál 10 m-ként készítették.

Az összefüggéseket a feszültség arányára kifejezve az alábbi egyenleteket kapjuk:

$(\sigma_{max}/MR)_{15} = 1{,}037 - 0{,}062 * \log N$ a hiba 15 %-os valószínűségének esetén,

$(\sigma_{max}/MR)_{50} = 1{,}082 - 0{,}054 * \log N$ a hiba 50 %-os valószínűségének esetén.

A fáradási függvényeket a **6. ábrában** mutatjuk.



6. ábra Japánban 1985 évben kísérleti betonburkolatú szakaszokon meghatározott fáradási összefüggés

2. MÁSODIK CSOPORTBA TARTOZÓ, $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ARÁNYÁVAL KORRIGÁLT FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉSEK

2.1. Svéd méretezési módszer szerint

A svéd méretezést ismertető [8.] cikk az alábbi:
Örjan Petersson: Swedish Design Method for Jointed Concrete Pavements.
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements
Sigüenza – Spain 1990. October 4 - 5

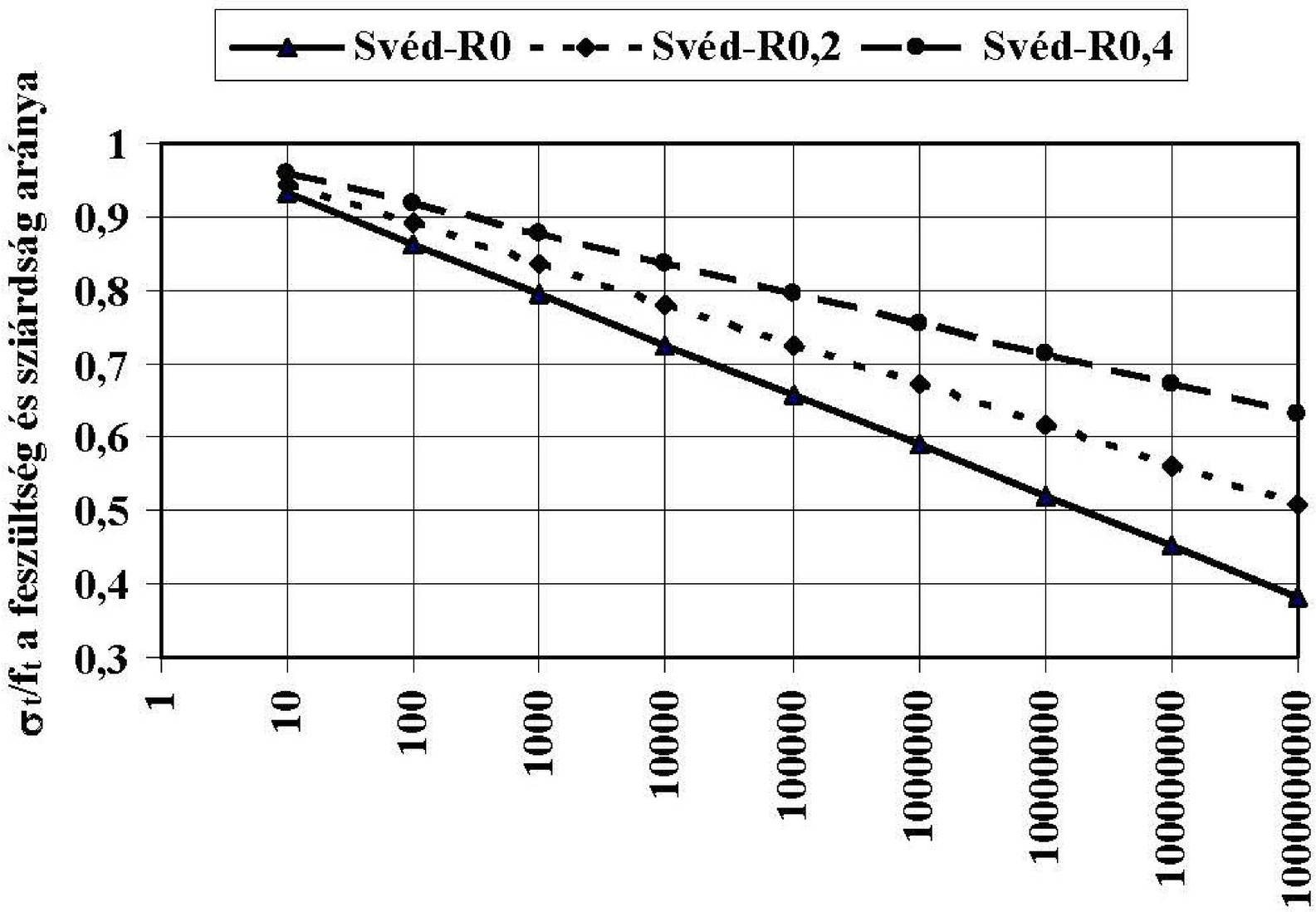
A hajlító-húzószilárdság fáradási összefüggése az ismételt igénybevétel hatására a következő:

$$\sigma_{ct}/f_{ct} = 1 - 0{,}0685\ (1\text{-}R)\ \log N$$

ahol

σ_{ct}	legnagyobb feszültség (forgalmi terhelés +hőmérséklet-eloszlás), Mpa,
f_{ct}	előírt hajlító-húzószilárdság, Mpa,
R	$\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ha nincs egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás, akkor R = 0,
N	10 t-ás egységtengely terhelésismétlések száma.

Az összefüggést a **7. ábra** mutatja.



7. ábra Fáradási szilárdság a svéd méretezési utasításban

Az ábrában három összefüggést ismertetek, ezek a következők:

- Svéd-R0 jelű összefüggésben nincs egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás, ezért $\sigma_{min} = 0$ és R=0.
- Svéd-R0,2 összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ arány =0,2.
- Svéd-R0,4 összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ arány =0,4.

2.2. Belgiumi fáradási összefüggés az egyenlőtlen hőmérséklet eloszlás figyelembe vételével

A módszert ismertetése szintén az 1.3. szakaszban már közölt, alábbi [5.] cikkben szerepel:
VEVERKA V.: The Belgian Road Research Center's Design Procedure for Concrete Pavements
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

A fáradási tönkremenetelt abban az esetben, ha az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból keletkező feszültséget is számításba kell venni (hézagolt betonburkolatoknál) az alábbi összefüggésből számítják:

$$s \leq \bar{\mathbf{r}}\,(1\text{-}0{,}05\ .\ \log n).X$$

ahol $n = \dfrac{\mathbf{0{,}25 \cdot N_c}}{\mathbf{1000}}$ (ezt abból a megfontolásból tették, hogy a legnagyobb hőmérsékleti gradiens éves gyakorisága 1 ‰ (1:1000),

σ a hasznos terhelés által létrehozott hajlítás húzófeszültsége,

s az összes hajlító-húzófeszültség (ha a betontábla hossza > 6 m a terhelésből létrejött σ_p feszültség és az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás $\sigma_{\Delta t}$ húzófeszültségének összege),

$\bar{\mathbf{r}}$ a betonburkolat átlagos hajlító húzószilárdsága,

X a meghibásodás vagy törés vállalt kockázata alapján alkalmazott csökkentő tényező az 1.3. szakaszban ismertetett 3. ábra szerint,

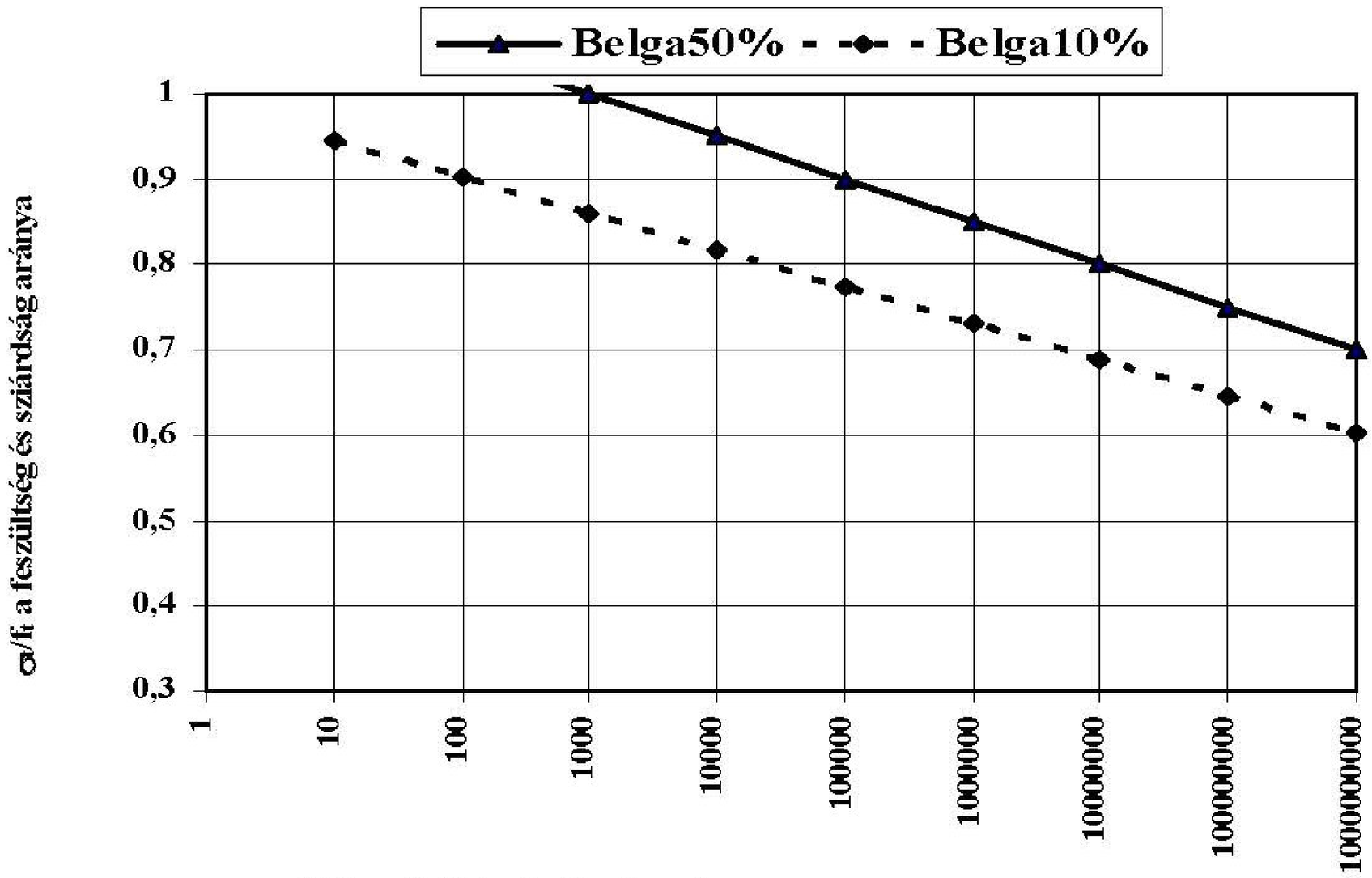
Nc az egyik irányban a burkolat 40 éves élettartama alatt áthaladó tehergépkocsik száma.

Ha a forgalomra nincs érvényes forgalomi adat, akkor az alábbiak szerint felvett 40 éves forgalommal számolnak:

2x3 forgalmi sávval kialakított autópályán	$5{,}4\ .\ 10^7$
2x2, forgalmi sávval kialakított autópályán	$3{,}2\ .\ 10^7$
2x2, forgalmi sávval kialakított elsőrendű főúton	$3{,}2\ .\ 10^7$

Az összefüggést a **8. ábra** mutatja.

Az ábrában a vállalt törési kockázattal két fáradási összefüggést mutatok be. A Belga 50% jelűnél a kockázat 50 %-os, a Belga10% jelű összefüggésben a törési kockázatot 10 %-kal számítottam.



8. ábra Belgiumban alkalmazott fáradási összefüggés egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás esetén

2.3. A betonburkolatok méretezésének Olaszországban bevezetett módszerénél alkalmazott fáradási összefüggés

Az összefüggést az 1.2. szakaszban említett következő [3.] cikk ismerteti:
Lorenzo Domenichini - Paola di Mascio: Procedure for JPCP Thickness Design in Italy
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements
Sigüenza – Spain 4 – 5 October 1990.

A betonburkolat sérülését vagy tönkremenetelét előidéző igénybevétel nem várható azonnal a 28 napos kort követően, ezért szükségesnek tartják a betonburkolat 28 napos (4,5 Mpa) hajlító húzószilárdságának, amelyet gerendán két erőterheléssel határoznak meg, későbbi „t” érlelési korra is meghatározni, erre kidolgozott összefüggés a következő:

$$MR(t) = MR(28) * [1{,}22 + 0{,}17*\log t - 0{,}05*(1\log t)^2]$$

ahol MR a hajlító húzószilárdság t éves korban vagy 28 napos korban

A rugalmassági modulus korral függő változását szintén számítják, a meghatározott összefüggés a következő

$$E = 18000 * \sqrt{R_{ck}}$$

ahol

R_{ck} a burkolati beton jellemző nyomószilárdsága kg/cm^2 mértékegységben.

Poisson tényezőt 0,2 értékkel veszik figyelembe.

Domenichini szerint a fáradási összefüggés a következő:

$$\log N = 10{,}48 \frac{(1-SR)}{1-R}$$

ahol N a terhelésismétlések száma,
MR a hajlító húzószilárdság,

$$SR = \frac{\sigma_{max}}{MR};$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}};$$

$$\sigma_{max} = \sigma_p + \sigma_{\Delta t};$$

σ_p a forgalmi igénybevétel által létrejött feszültség,

$\sigma_{\Delta t}$ az egyenlőtlen hőmérséklet hatására kialakult húzófeszültség.

A terhelésismétlés száma helyett az SR arány értékére kifejezve az összefüggést a következő fáradási összefüggést kapjuk:

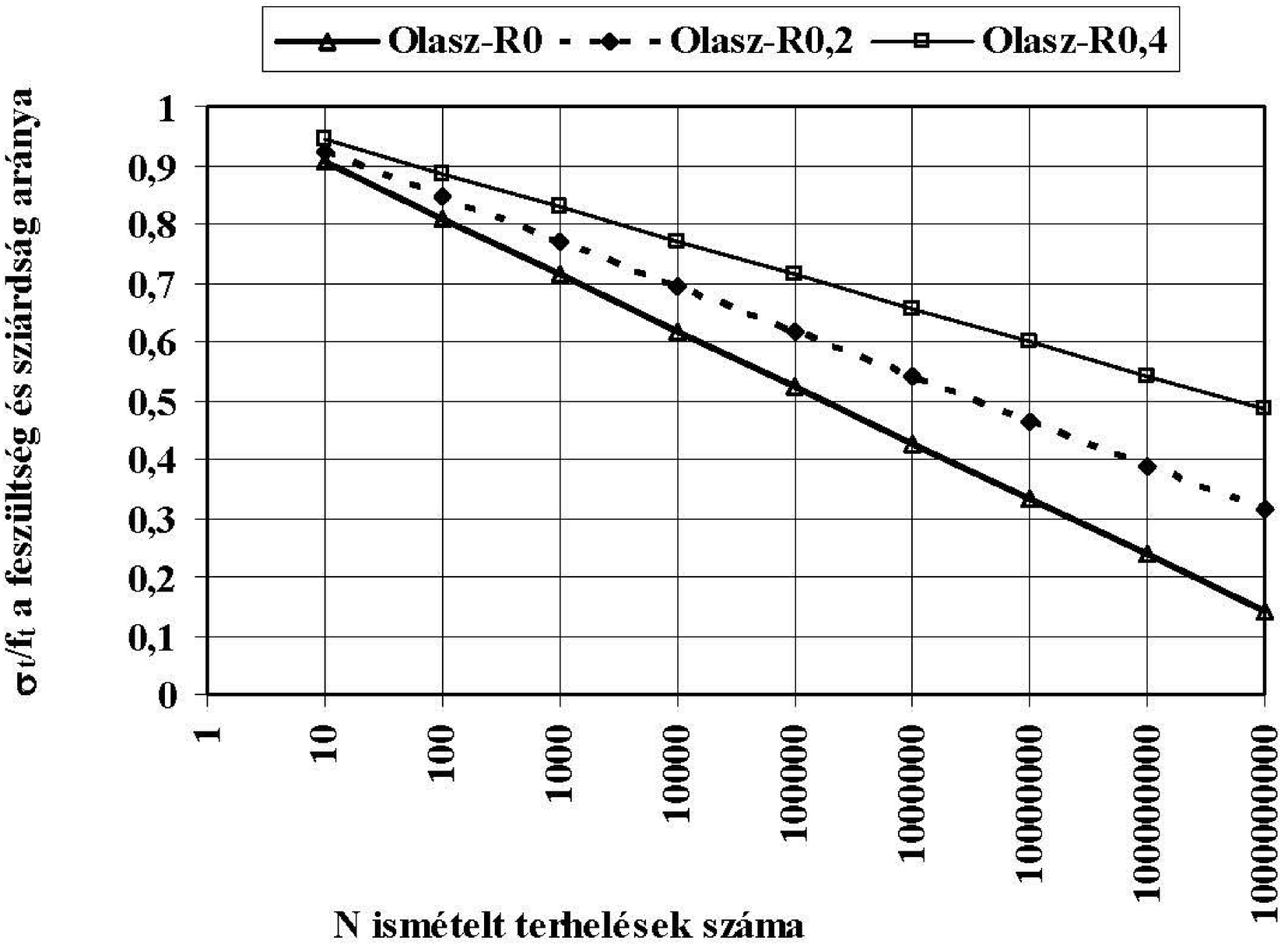
$$SR = \frac{\sigma_{max}}{MR} = 1 - (1-R) * \frac{\log N}{10{,}48}$$

Ha $\sigma_{min} = 0$ akkor

$$SR = \frac{\sigma_{max}}{MR} = 1 - \frac{\log N}{10{,}48}$$

Az összefüggést a **9. ábra** mutatja. Az ábrában az egyenlőtlen hőmérséklet miatt kialakuló feszültség arányának megválasztásával három fáradási összefüggést ismertetek, ezek az alábbiak:

- Olasz-R0 jelű összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0$ vagyis egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból nem keletkezik feszültség.
- Olasz-R0,2 jelű összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ arány =0,2.
- Olasz-R0,4 jelű összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ arány =0,4.



9. ábra Olaszországban alkalmazott összefüggés a fáradási szilárdságra, ha $\sigma_{min} = 0$; $\sigma_{min}/\sigma_{max} = 0,2$; és $\sigma_{min}/\sigma_{max} = 0,4$.

2.4. Fáradási összefüggés Spanyolországban

Spanyolországban a beton kifáradásának meghatározására alkalmazott összefüggés hasonló az Olaszországban bevezetettel.

Az összefüggéseket a következő [9.] cikk ismerteti:
V. Faraggi - C. Jofre - C. Kraemer: Combined Effect of Traffic Loads and ThermalGradients on Concrete Pavement Design
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

A fáradási összefüggésben a nullától eltérő legkisebb szilárdságot figyelembe vették és a fáradási szilárdságnak az igénybevételek ismétlésének számától függő fáradását az olaszoknál alkalmazottal azonos módon számítják.

A fáradási összefüggés a következő:

$$\log N = 11 \cdot \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{max}}{MR}\right)}{\left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}\right)}$$

ahol

σ_{max} a forgalmi terhelés +az egyenlőtlen hőmérséklet hatására kialakuló feszültség,

σ_{min} az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás következményeként kialakuló hajlító-húzófeszültség,

MR a hajlító-húzószilárdság,

N a terhelés ismétlések száma.

Az összefüggést átalakítva a terhelés ismétlésétől függő szilárdsági arányt a következők szerint kapjuk meg:

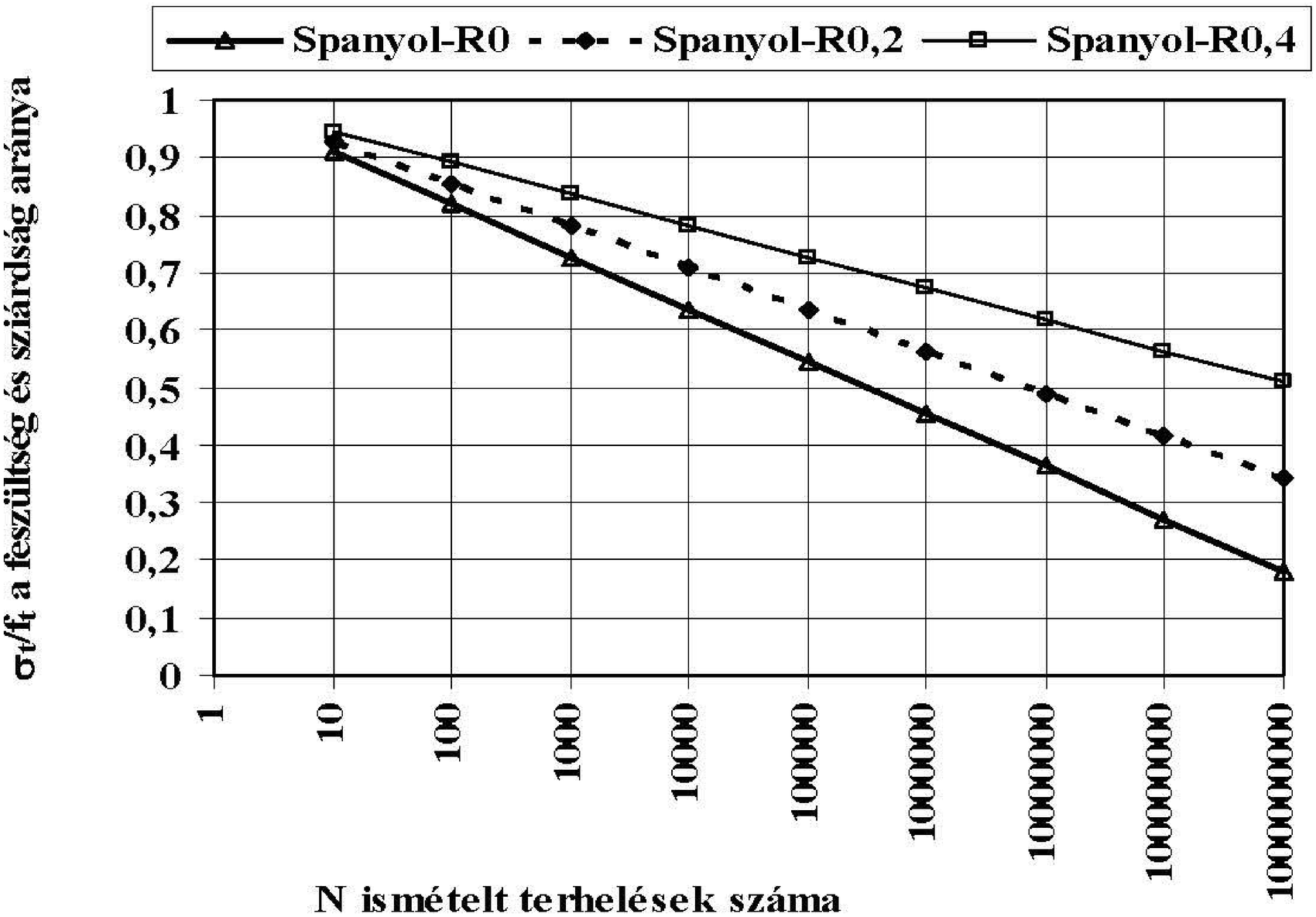
$$\sigma_{max}/MR = 1 - 0{,}091 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}\right) \cdot \log N$$

Ha $\sigma_{min} = 0$, akkor az összefüggés a következő:

$$\sigma_{max}/MR = 1 - 0{,}091 \cdot \log N$$

A fáradási összefüggést a **10 ábra** mutatja. Az ábrában az egyenlőtlen hőmérséklet miatt kialakuló feszültség arányának megválasztásával három fáradási összefüggést ismertetek, ezek az alábbiak:

- Spanyol-R0 jelű összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0$ vagyis egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból nem keletkezik feszültség.
- Spanyol-R0,2 jelű összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ arány =0,2.
- Spanyol-R0,4 jelű összefüggésben az $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ arány =0,4.



10. ábra Spanyolok által használt fáradási összefüggés

2.5. Kínában alkalmazott fáradási összefüggés

A fáradási összefüggés Kínában is teljesen hasonló az olasz és spanyol összefüggésekel. A méretezést és a fáradási összefüggést a következő [10.] cikk ismerteti:

Zukang Yao: Structural Design of Concrete Pavements in China
Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation
April 23-25, 1985 Prudue University West Lafayette, Indiana USA

Az alkalmazott fáradási összefüggés a következő:

$$\log N = 13{,}02 \cdot \frac{\left(0{,}944 - \frac{\sigma_p + \sigma_t}{MR}\right)}{\left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_p + \sigma_t}\right)}$$

ahol

σ_p a forgalmi terhelésből létrejött feszültség,
σ_t az egyenlőtlen hőmérséklet hatására létrejött húzófeszültség,
$\sigma_{max} = \sigma_p + \sigma_t$
MR a hajlító húzószilárdság,

N a terhelésismétlések száma.

Az átalakított összefüggés a következő:

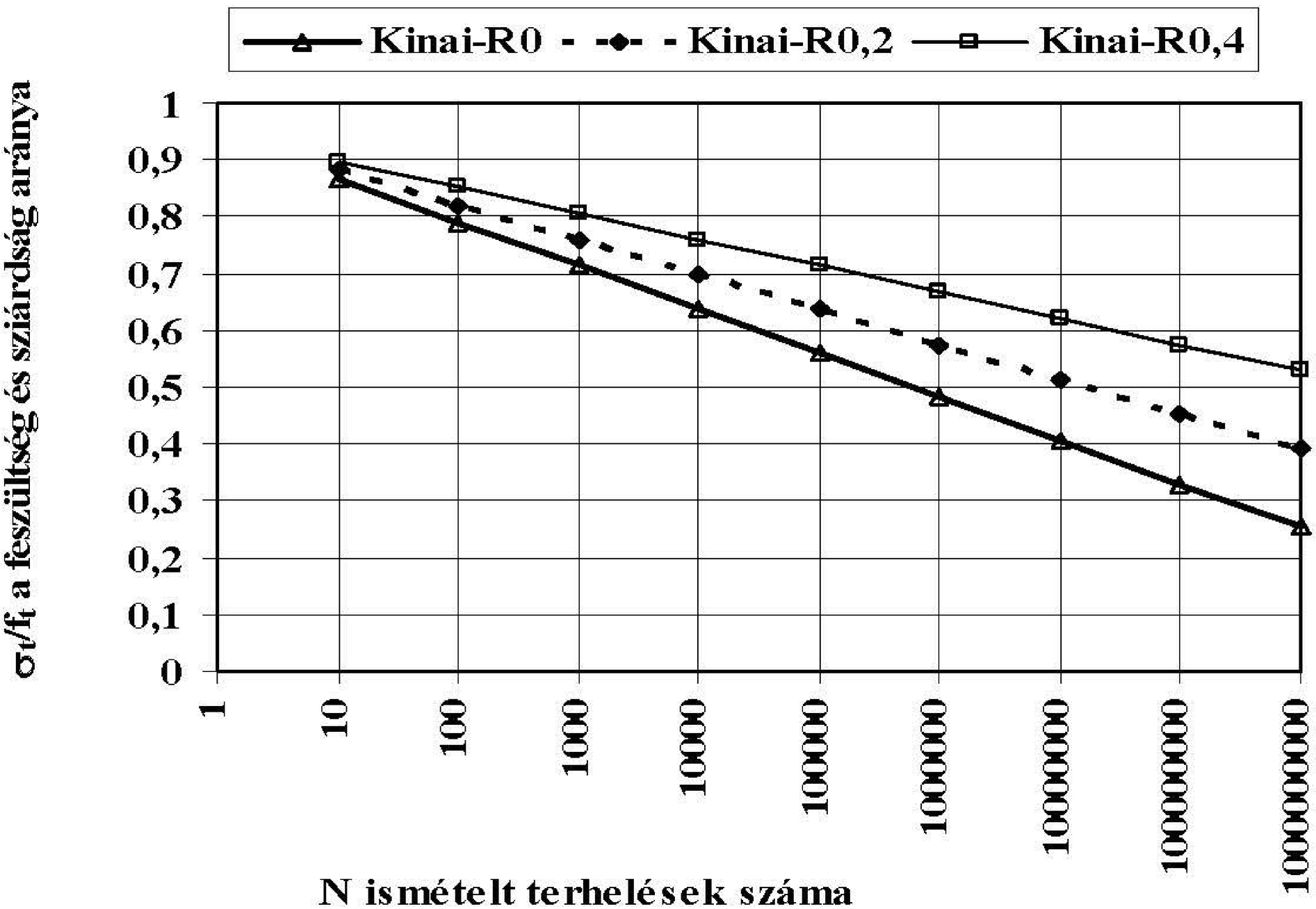
$$(\sigma_p+\sigma_t)/MR = 0{,}944 - 0{,}0768\cdot\left(1-\frac{\sigma_t}{\sigma_p+\sigma_t}\right)\cdot \log N$$

Ha $\sigma_t = 0$, akkor az összefüggés a következők szerint egyszerűsödik:

$$\sigma_p/MR = 0{,}944 - 0{,}0768\cdot \log N$$

A kínai fáradási összefüggést a **11 ábrában** mutatjuk. Az ábrában az egyenlőtlen hőmérséklet miatt kialakuló feszültség arányának megválasztásával három fáradási összefüggést ismertetek, ezek az alábbiak:

- Kinai-R0 jelű összefüggésben az $R = \sigma_t/\sigma_{max} = 0$ vagyis egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból nem keletkezik feszültség.
- Kinai-R0,2 jelű összefüggésben az $R = \sigma_t/\sigma_{max}$ arány =0,2.
- Kinai-R0,4 jelű összefüggésben az $R = \sigma_t/\sigma_{max}$ arány =0,4.



11. ábra A kínai fáradási összefüggés

3. A FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉSEK HARMADIK CSOPORTJA $\Delta\sigma/f_{tk}$ ÉS σ_{min}/f_{tk} ARÁNYOK HASZNÁLATÁVAL

3.1. Hollandiában és Dániában alkalmazott fáradási összefüggés

Hollandiában és Dániában Vereniging Nederlandse Cementindustrie által kifejlesztett VNC fáradási összefüggést használják. Ebben az összefüggésben is figyelembe veszik a igénybevétel hatására keletkező legnagyobb feszültség mellett a legkisebb feszültséget is, mert amennyiben a legkisebb feszültség nullánál nagyobb, akkor az ismétlődés hatására a fáradás lassabban következik be.

Az összefüggést a következő [11.] [12.] és [13.] cikkek ismertetik:
H. E. van der Most – M. Leewis: Design of Concrete Pavements
5th international Symposium on Concrete Roads Aachen 2 – 4 June 1986.

H. A. W. Cornelissen - M. Leewis: Fatigue experiments for the Design of Plain Concrete Pavements
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

L. J. M. Houben: Two Dimencional Finite Element analysis of Unreinforced Concrete Pavements
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements
Sigüenza – Spain 4 – 5 October 1990

A beton kifáradásáig az igénybevétel ismétlődésének száma a következő:

$$\log N = 12{,}6 \cdot \left[1 - \frac{0{,}8 \cdot \left(\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{f_{bk}} \right)}{0{,}8 - \frac{\sigma_{min}}{f_{bk}}} \right]$$

ahol

- N a terhelésismétlés száma a beton kifáradásáig,
- σ_{max} a forgalmi terhelés és az egyenlőtlen hőmérsékleteloszlás által keletkező feszültség,
- σ_{min} az egyenlőtlen hőmérsékleteloszlás által keletkező feszültség,
- f_{bk} a beton hajlító húzószlilárdságának jellemző értéke (Hollandiában $f_{bk} = 4{,}6$ N/mm^2 90 napos korban).

A $\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{f_{bk}} = \frac{\Delta\sigma}{f_{bk}}$ arányát kifejezve az összefüggés a következő:

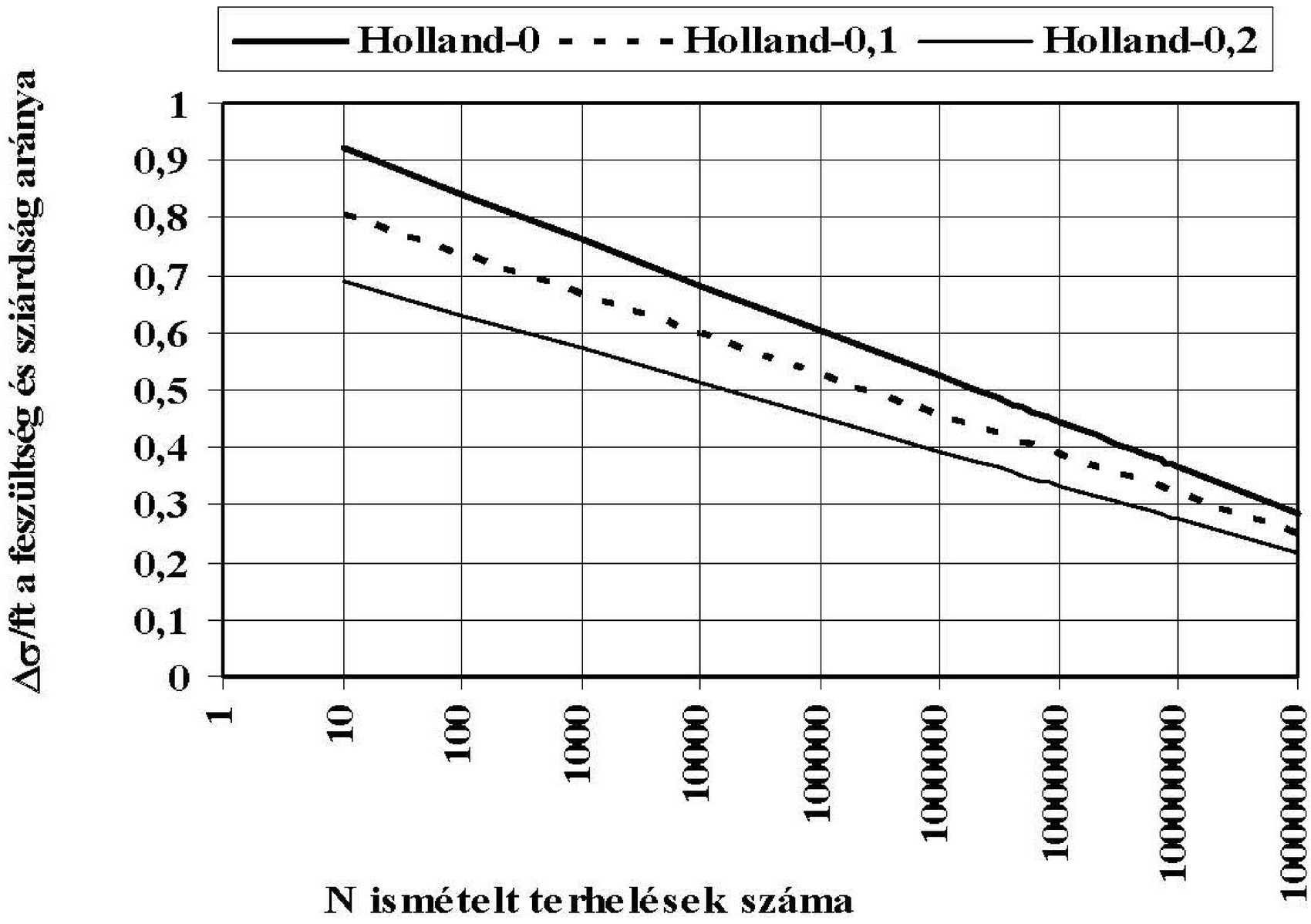
$$\frac{\Delta\sigma}{f_{bk}} = [1{,}25 - 0{,}0992 \cdot \log N] \cdot \left(0{,}8 - \frac{\sigma_{min}}{f_{bk}}\right) = [1 - 0{,}07936 \cdot \log N] \cdot \left(1 - 1{,}25\frac{\sigma_{min}}{f_{bk}}\right)$$

Ha $\sigma_{min} = 0$, akkor az összefüggés a következő:

$$\frac{\sigma_{max}}{f_{bk}} = 1 - 0{,}07936 \cdot \log N = 1 - \frac{\log N}{12{,}6}$$

Az összefüggést a **12. ábra** mutatja. Az ábrában az egyenlőtlen hőmérséklet miatt kialakuló feszültség arányának megválasztásával három fáradási összefüggést ismertetek, ezek az alábbiak:

- Holland-0 jelű összefüggésben az $\sigma_{min}/f_{bk} = 0$ vagyis egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból nem keletkezik feszültség.
- Holland-0,1 jelű összefüggésben az $\sigma_{min}/f_{bk} = 0{,}1$.
- Holland-0,2 jelű összefüggésben az$\sigma_{min}/f_{bk} = 0{,}2$.



12. ábra Holland Cementipari Szövetség által kidolgozott fáradási összefüggés (VNC módszer) $\sigma_{min} = 0$; $\sigma_{min}/f_{bk} = 0{,}1$; és $\sigma_{min}/f_{bk} = 0{,}2$; esetben

Ha σ_{min} nem egyenlő nullával, akkor a fáradási görbe hajlásszöge csökken, a beton kifáradása a terhelés ismétlődés hatására lassabban következik be, de a második csoportba tartozó összefüggésekhez képest a feszültségkülönbség aránya kisebb lesz az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból származó feszültséget nem tartalmazó feszültség arányú összefüggéshez képest.

4. KÜLÖNBÖZŐ FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉS CSOPORTOK EGYÜTTES BEMUTATÁSA

A fáradási összefüggéseket a legnagyobb húzófeszültségnek a hajlítási húzószilárdsághoz viszonyított arányában fejeztük ki, és az ábrákban is az ordinátatengelyen ábrázoltuk σ_{max}/f_t (legnagyobb feszültség/hajlító-húzószilárdság) arányt. A fáradási összefüggéseket három különböző csoportba soroltuk:

Az első csoportban a terhelés hatására kialakuló feszültség alsó határával nem foglalkoznak, az tehát nullától a legnagyobb feszültségig változik.

A második csoportban a legkisebb és legnagyobb feszültség arányával korrigálják a feszültség/szilárdság aránya és a terhelésismétlések száma közötti összefüggést. Ha a legkisebb szilárdság nagyobb lesz, akkor a terhelésismétlések száma miatt szükséges feszültség/szilárdság arány nagyobb lesz, illetve adott feszültség/szilárdság arány esetén a nullánál nagyobb legkisebb feszültség kedvező hatása miatt az ismétlések száma növelhető.

A harmadik csoportban nem a legkisebb és legnagyobb feszültség arányával korrigálják az összefüggést, hanem a legkisebb feszültség és a szilárdság arányát számítják, és nem a legnagyobb feszültséget viszonyítják a szilárdsághoz, hanem a legnagyobb és legkisebb feszültség különbségét.

Az 1.-3. fejezetben ismertetett összefüggéseket az eredeti cikkekben közölt jelölésekkel azonosan adtam meg, a következőkben azonban egységes jelöléseket alkalmazok az összefüggésekben a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében, ezek a következők:

σ_{max}	hajlító-húzófeszültség a legnagyobb terhelés hatására beleértve az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás okozta feszültséget is
σ_{min}	legkisebb hajlító-húzófeszültség, mely általában a hőmérséklet-eloszlás hatására jön létre
f_t	hajlító-húzószilárdság általában hasáb alakú próbatesten, a támaszok közötti távolság harmadolásában két erőterheléssel vizsgálva
f_{tm}	hajlító-húzószilárdság átlagos értéke
f_{tk}	hajlító-húzószilárdság jellemző értéke
$\Delta\sigma$	σ_{max} és σ_{min} értékek különbsége

4.1. Az első csoportba tartozó fáradási összefüggések:
Az első csoportba tartozó összefüggéseket az alábbiakban megismételjük és a 13. ábrában együtt is bemutatjuk.

4.1.1. Vesic-Saxena összefüggése:

$$\sigma_{max}/f_t = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{N}{225000}}}$$

4.1.2. Darter fáradási összefüggései:

4.1.2.1. Darter 1. módszer: meghibásodás valószínűsége 24 %

$$\sigma_{max}/f_t = \frac{16{,}61 - \log N}{17{,}61} = 0{,}9432 - 0{,}05678 \cdot \log N$$

4.1.2.2. Darter 2. módszer $\sigma_{max}/f_t = \frac{17{,}61 - \log N}{17{,}61} = 1 - 0{,}05678 \cdot \log N$

4.1.2.3. Darter 3. lineárisnak nevezett összefüggése:

$$\sigma_{max}/f_t = \frac{2{,}512}{\log N - 0{,}3498}$$

4.1.2.4. Darter 4. exponenciálisnak nevezett összefüggés:

$$\sigma_{max}/f_t = \frac{1}{\sqrt[1{,}2]{0{,}4695 \cdot \log N}}$$

„N" az ismétlések száma a betontáblák 50 %-ának töréséig.

4.1.3. Belgiumi Útügyi Kutatóintézet fáradási összefüggése:
A méretezéseknél ténylegesen alkalmazott fáradási tönkremenetelhez szükséges összefüggésre két változatot használnak. A jelenlegi 4.1.3. fáradási összefüggést abban az esetben alkalmazzák, ha az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból keletkező feszültséget nem kell figyelembe venni. Ez az eset a folytatólagosan vasalt betonburkolatnál és 6 m-nél rövidebb betontábláknál. A másik összefüggésben egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból keletkező feszültséget is számításba veszik, lásd 4.2.2. szakasznál. Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás feszültségét nem tartalmazó összefüggés a következő:

$$\sigma_{max}/f_t = (1\text{-}0{,}05 \,.\, \log n).X$$

ahol $n = 0{,}25\ N_c$

N_c = az egy irányban haladó tehergépkocsik száma 40 év alatt,

X = 0,69→0,1 % hibakockázatnál
0,77→ 1 % hibakockázatnál
0,835→5 % hibakockázatnál
0,86 →10 % hibakockázatnál
0,91→20 % hibakockázatnál
0,95→30 % hibakockázatnál
0,97→40 % hibakockázatnál
1,00→50 % hibakockázatnál

4.1.4. PCA USA 1985. fáradási összefüggése:

Ha $\sigma_{max}/f_t > 0{,}55$ akkor az összefüggés: $\sigma_{max}/f_t = 0{,}971 - 0{,}08278 \,.\, \log N$

Ha σ_{max} / f_t = 0,45 és 0,55 közötti, akkor az összefüggés:

$$\sigma_{max} / f_t = 0{,}4325 + \frac{4{,}2577}{[N]^{\frac{1}{3{,}268}}}$$

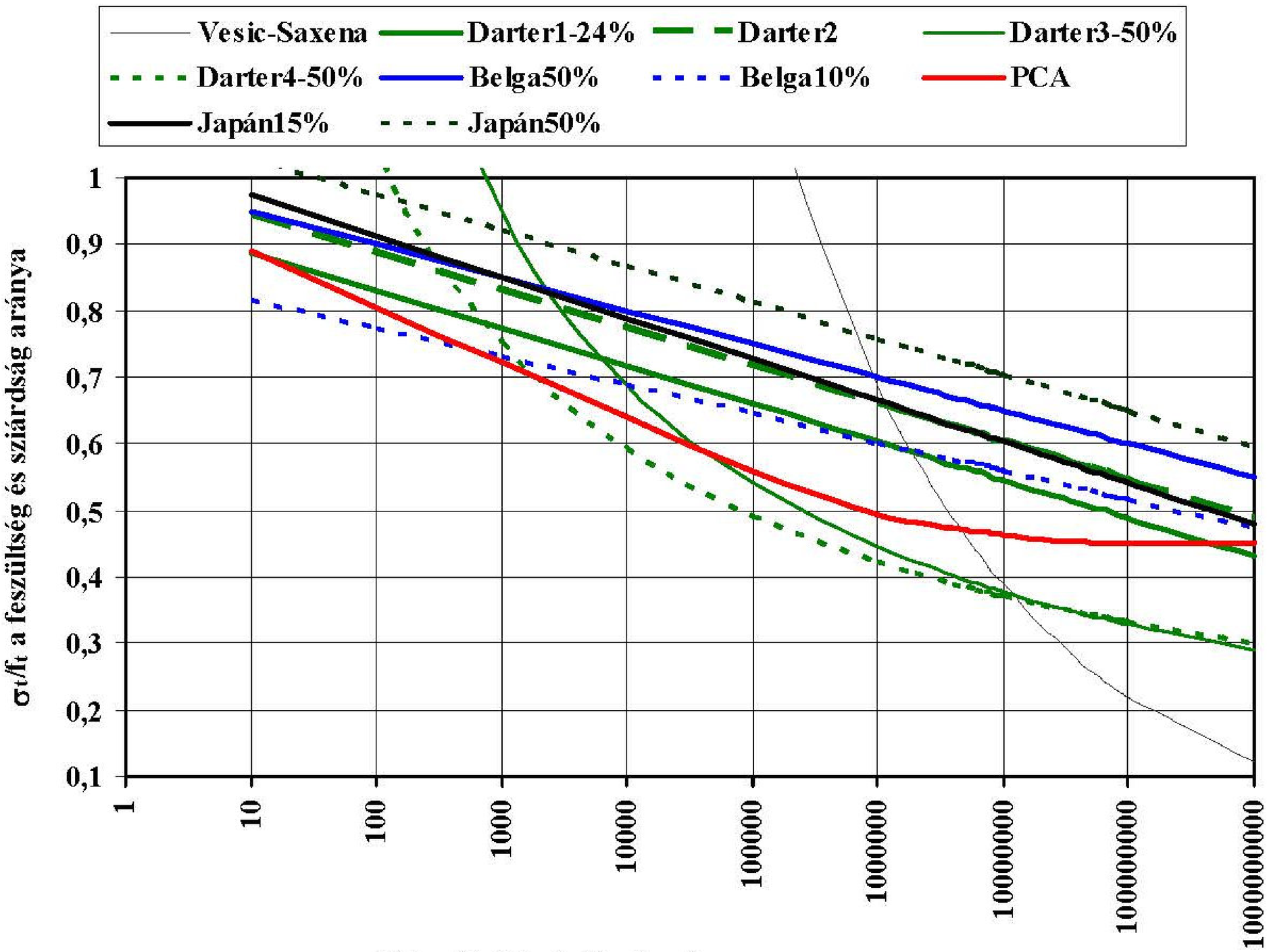
Ha σ_{max} / f_t < 0,45, akkor log N nincs korlátozva (bármilyen nagy lehet)

4.1.5. Fáradási összefüggés Japánban

Japánban alkalmazott összefüggések 15 %-os és 50 %-os hiba-előfordulási valószínűségek esetére a következők:

$(\sigma_{max}/f_t)_{15}$ = 1,037 – 0,062 * log N a hiba 15 %-os valószínűségének esetén,

$(\sigma_{max}/f_t)_{50}$ = 1,082 – 0,054 * log N a hiba 50 %-os valószínűségének esetén.



13. ábra Az első csoportba tartozó fáradási összefüggések

4.2. Második csoportba tartozó összefüggések:

A második csoportba tartozó összefüggéseket az alábbiakban megismételjük és a

12. ábrában együtt is bemutatjuk.

4.2.1. Svéd módszer: $\sigma_{max}/f_t = 1 - 0{,}0685\ (1\text{-}R)\ \log N$

4.2.2. Belgiumi Útügyi Kutatóintézet fáradási összefüggése:

Fáradási tönkremenetel abban az esetben, ha egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból keletkező feszültséget is számításba kell venni (hézagolt betonburkolatoknál):

$$\sigma_{max}/f_{tm} = (1\text{-}0{,}05\ .\ \log n).X \qquad n = \frac{\mathbf{0{,}25 \cdot N_c}}{\mathbf{1000}}$$

ahol

N_c = az egy irányban haladó tehergépkocsik száma 40 év alatt

X értékeit lásd 10.1.-4. képletnél.

4.2.3.. Domenichini (Olaszország) fáradási összefüggése:

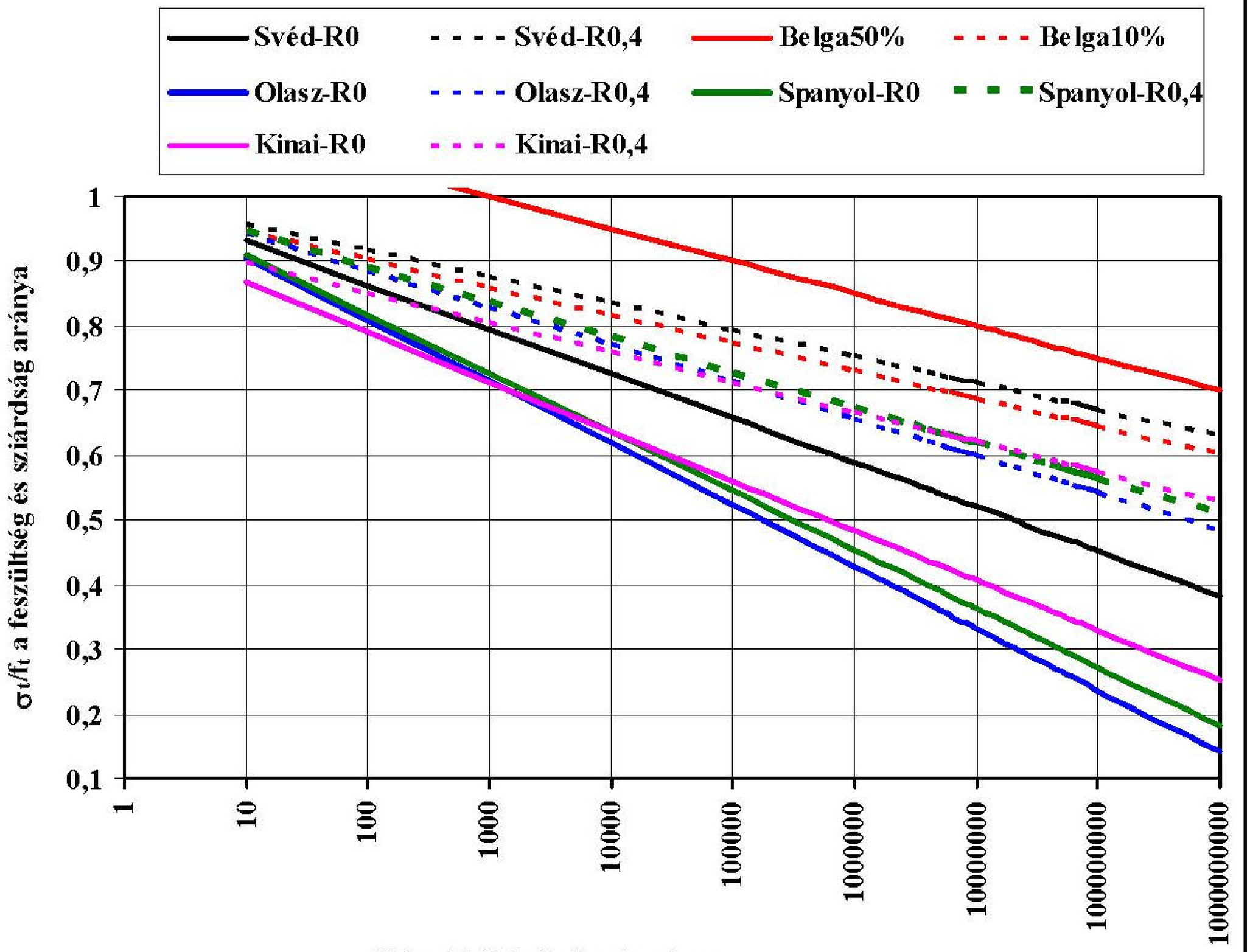
$$\sigma_{max}/f_t = 1 - \left(1-\frac{\boldsymbol{\sigma_{min}}}{\boldsymbol{\sigma_{max}}}\right) . \frac{\mathbf{\log N}}{\mathbf{10{,}48}} = 1- 0{,}09542 . \left(1-\frac{\boldsymbol{\sigma_{min}}}{\boldsymbol{\sigma_{max}}}\right) . \log N$$

4.2.4. Spanyolországban alkalmazott fáradási összefüggés:

$$\sigma_{max}/f_t = 1 - 0{,}091 \cdot \left(\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{\sigma_{min}}}{\boldsymbol{\sigma_{max}}}\right) \cdot \mathbf{\log N}$$

4.2.5. A kínai összefüggés:

$$\sigma_{max}/f_t = 0{,}944 - 0{,}0768 \cdot \left(\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{\sigma_{min}}}{\boldsymbol{\sigma_{max}}}\right) \cdot \mathbf{\log N}$$



14. ábra A második csoportba tartozó fáradási összefüggések

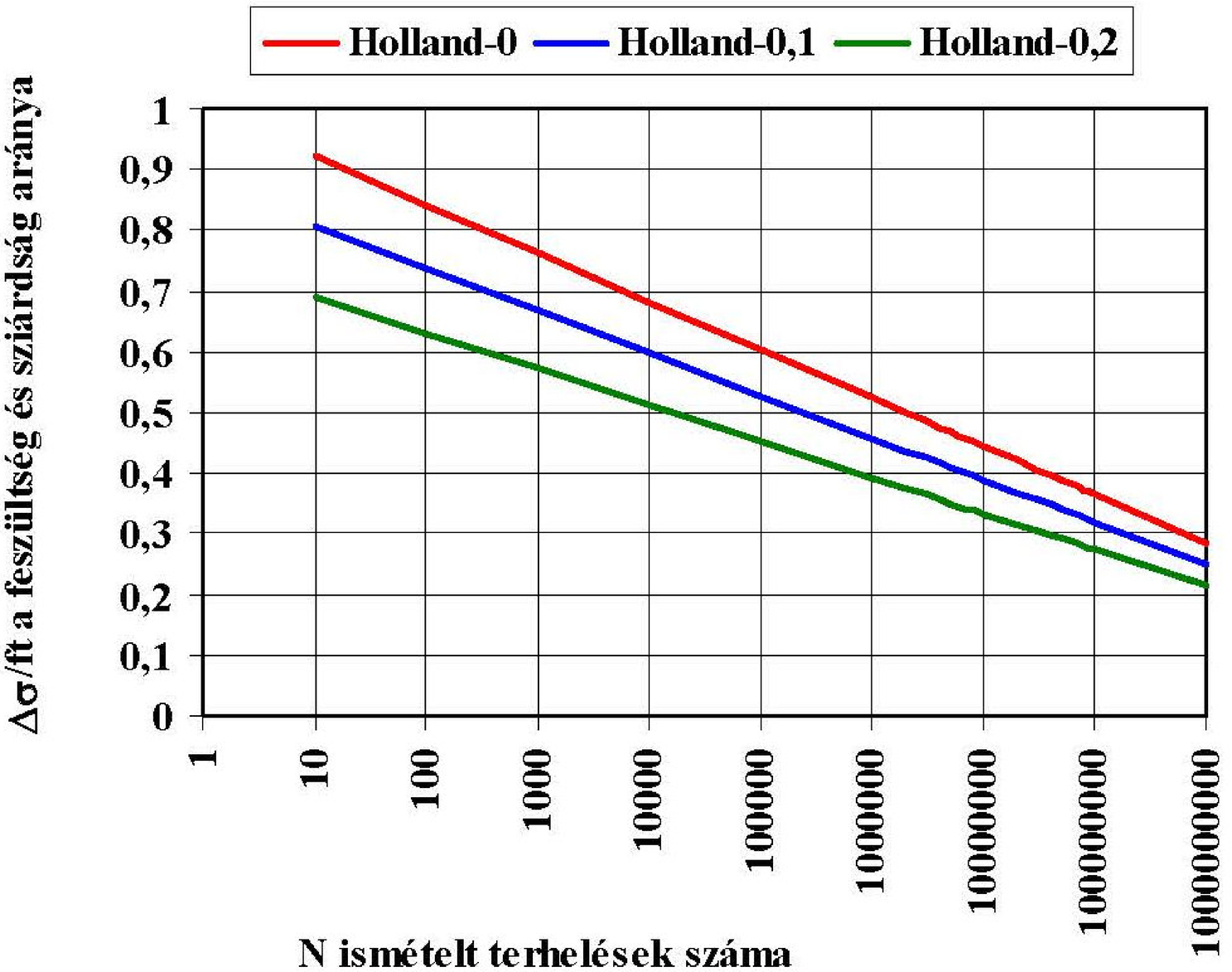
4.3. Harmadik csoportba tartozó fáradási összefüggés

4.3.1. Hollandiában és Dániában alkalmazott fáradási összefüggés:

$$\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{f_{tk}} = \frac{\Delta\sigma}{f_{tk}} = \left[1{,}25 - 0{,}0992 \cdot \log N\right] \cdot \left(0{,}8 - \frac{\sigma_{min}}{f_{tk}}\right)$$

Az összefüggést a **15. ábra** mutatja a következő feltételekkel és jelölésekkel

$\sigma_{min} = 0$	jele:	Holland-0
$\sigma_{min}/f_{tk} = 0{,}1$	jele:	Holland-0,1
$\sigma_{min}/f_{tk} = 0{,}2$	jele:	Holland-0,2



15. ábra A harmadik csoportba tartozó fáradási összefüggések

4.4. A fáradási összefüggések értékelése

Az ismételt igénybevételek hatására kialakuló fáradási szilárdságok kiszámítására készített összefüggéseket megismerve a következőket lehetett megállapítani.

Az első csoportba tartozó összefüggések alkalmazása azért célszerű, mert mindenfajta igénybevételnek a szilárdságra gyakorolt fárasztó hatását azonos módon veszi figyelembe, azonos módon számítja. Amennyiben többfajta, de nem azonos ismétlési számokkal fellépő igénybevételek hatását kell meghatározni, akkor azokat az ismétlési számoknak megfelelően kell számításba venni, és a megfelelőséget végül a Miner fáradási törvény alkalmazásával kell meghatározni.

Az első csoportba tartozó fáradási összefüggések közül Vesic-Saxena összefüggését nem tekinthetjük megfelelőnek, mert csak viszonylag szűk ismétlési számok esetén ad használható eredményt.

Ugyan csak használhatatlannak kell tekinteni Darter 3. és Darter 4. összefüggését, mert N=35000 terhelés ismétlési számra alapozott összefüggéssel nem lehet több millió ismétlés hatását megbecsülni.

A maradt összefüggések közül a legnagyobb figyelmet a **Japán összefüggés** érdemel, mert az összefüggést különböző vastagságú, igénybevételű betontáblák ismételt terhelésének vizsgálatával, nagyméretű kísérletsorozat eredményeiből határozták meg.

Fontosnak tartom a **Portland Cement Association összefüggését,** mert az elméleti megfontolások szerint a legvalószínűbb, hogy a terhelő igénybevételnél létezik alsó határérték, melynél kisebb terhelés esetén a rendkívül nagy ismétlés mellett sem következik be tönkremenetel. A PCA összefüggését ismertető cikk sajnos nem közölt semmit arról, hogy az összefüggést mire alapozva határozták meg

A második csoportba tartozó összefüggések elméleti megfontolása nem teljesen fogadható el. Az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás hatására a betonlemezben hajlító-húzófeszültség keletkezik, mely a burkolat felső felülete közelében a legnagyobb, ha a lemez a hőmérsékletemelkedés és napsugárzás hatására felmelegedik, és az alsó felület még hűvös marad. Ilyen esetben a hasznos terhelés először a felsőrész húzó- és alsórész nyomófeszültségét szünteti meg, majd felül nyomó- alul húzófeszültséget hoz létre. A hasznos terhelés hatására kialakuló fárasztási szilárdság ezért kisebb, amikor a betonlemezben nincs feszültség, és nulláról emelkedik a legnagyobb húzófeszültségig.

Ezzel az elméleti okoskodással az a baj, hogy az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás óráról-órára változik, és nap közben a húzott-nyomott felület is változhat. Jelentősen változik a hőmérséklet az évszakok alatt is. Nincs tehát olyan állandó legkisebb húzó- és nyomófeszültség a betonburkolatban, melyet figyelembe lehetne venni, és ezzel csökkenteni lehetne a hasznos terhelés által létrehozott húzófeszültséget.

A fordított eset is előfordulhat éjszaka vagy télen a léghőmérséklet lehűlésekor, mert ilyenkor a beton alsó felülete maradhat nagyobb hőmérsékletű, és a felső felület lesz hidegebb, tehát az alsó szélső szál lesz a húzott.

A betonburkolatokban kialakuló egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásának figyelembevételére a méretezésnél ismerni kell a hőmérsékleti gradienst és annak éves változását az országban.

1972 július 10-én az M7 autópálya 31+000 km szelvényének körzetében a betonburkolatba, a pályaszerkezeti rétegekbe és földműbe beépített hőérzékelőkkel két éven keresztül folyamatosan mérte a hőmérsékletet a Betonútépítő Vállalat megbízása alapján a BME Építőanyag Tanszéke. Ezekből az adatokból megfelelő feldolgozással és értékeléssel a hazai betonburkolatok méretezésénél alkalmazni szükséges feltételek egyes kérdéseire választ lehetne kapni.

A második csoportba tartozó fáradási összefüggések közül az Olasz, Spanyol és Kinai fáradási összefüggés nagyjából azonos sávban halad, a három összefüggés közötti eltérés nem nagy. A belgiumi összefüggésben a σ_{min} miatti korrekciót a többiektől eltérően határozták meg (az N ismétlés 1000-rel való osztásával), lehet, hogy ennek a következménye a sokkal kedvezőbb fáradási összefüggés. Számomra a **Svéd fáradási összefüggés** látszik legkiegyenlítettebbnek.

A harmadik csoportba tartózó összefüggés kevésbé átlátható, az eredménye valószínűleg nem nagyon tér el a második csoportban ismertetett összefüggésektől.

5. JAVASLAT A FÁRADÁSI ÖSSZEFÜGGÉSRE

A betonburkolatok hazai méretezésénél alkalmazandó fáradási összefüggést a következők alapján javaslom kiválasztani.

A felsorolt külföldi fáradási összefüggések közül a választásnál figyelembe venni javaslom az első és második csoportba tartozók közül a következőket.

5.1. Az első csoportba tartozó összefüggések:

A japán fáradási összefüggés talán a legfontosabb a burkolaton végzett fáradási kísérletek eredményeinek alkalmazása miatt

$(\sigma_{max}/ f_t)_{15} = 1{,}037 - 0{,}062 * \log N$ a hiba 15 %-os valószínűségének esetén,

$(\sigma_{max}/ f_t)_{50} = 1{,}082 - 0{,}054 * \log N$ a hiba 50 %-os valószínűségének esetén.

Portland Cement Association (PCA) USA szerinti fáradási összefüggése

Ha $\sigma_{max} / f_t > 0{,}55$ akkor az összefüggés;

$$\sigma_{max} / f_t = 0{,}971 - 0{,}08278 \cdot \log N$$

Ha $\sigma_{max} / f_t = 0{,}45$ és $0{,}55$ közötti, akkor az összefüggés

$$\sigma_{max} / f_t = 0{,}4325 + \frac{4{,}2577}{[N]^{\frac{1}{3{,}268}}}$$

Ha $\sigma_{max} / f_t < 0{,}45$, akkor log N nincs korlátozva (bármilyen nagy lehet)

PCA összefüggését a következő polinommal javaslom követni azzal, hogy $\sigma_{max} / f_t = 0{,}45$ helyett, 0,40 értékig csökkenhet, és 0,40-nél kisebb érték esetén az N bármilyen nagy ismétlési száma megfelel:

$$\sigma_{max}/f_t = 1{,}0 - 0{,}115 \cdot \log N + 0{,}00547 \cdot (\log N)^2$$

5.2. A második csoportba tartozó összefüggések:

Ha a második csoportba tartozó összefüggéseknek megfelelőt szükségesnek tartanánk alkalmazni, akkor a **Svéd módszert** javaslom figyelembe venni:

$$\sigma_{max}/f_t = 1 - 0{,}0685\,(1-\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}})\,\log N$$

5.3. Javaslat

Mérlegelve az eddigieket és a kiválasztott kisebb csoportokat az összes eddig vizsgálthoz hasonlítva a javaslatom a következő.

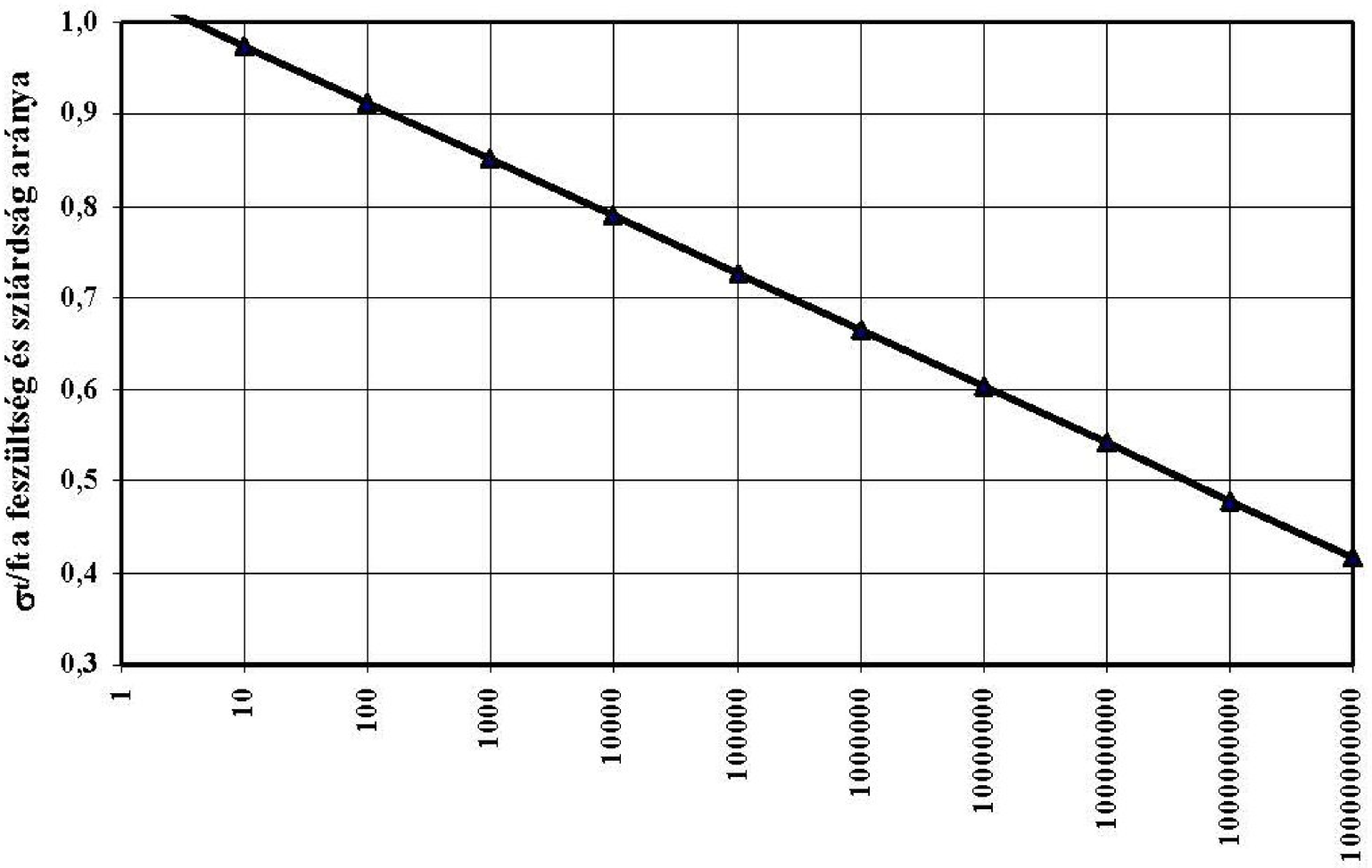
Fogadjuk el a japánok által kísérletekkel és azok vizsgálati eredményeivel alátámasztott fáradási szilárdságra vonatkozóan a 15 %-os hibavalószínűségre meghatározott összefüggést azzal, hogy az egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlásból számított húzófeszültség fárasztó hatását ugyan ennek az összefüggésnek megfelelően kell számításba venni.

Ehhez természetesen külön ki kell dolgozni a hőmérsékleti gradiens vagy gradiensek értékét, ha azokat az éghajlati körzetek szerint változtatni kell, és meg kell határozni a különböző gradiensek éves átlagos előfordulási időtartamának valószínűségét is.

A javasolt fáradási összefüggés

$$\sigma_{max}/\,f_{t15} \quad = \quad 1{,}037 - 0{,}062 * \log N$$

Az összefüggést a **16. ábra** mutatja.



16. ábra Magyarországon alkalmazni javasolt fáradási összefüggés

IRODALOM

1. Pavements Recommendations for Rigid Pavements Annex 1 Commentary Trans-European North-South Motorway Project (TEM/TC/WP.137
A: S: Vesic - S. K. Saxena: Analysis of structural Behavior of AASHTO Road Test Rigid Pavements. N. C. H. R. P. Rept. 97, 1970.

2. **J.S. Sawan, M. I. Darter:** Design of Slab Thickness and Joint Spacing for jointed Plain Concrete Pavement
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

3. **Lorenzo Domenichini, Paola di Mascio:** Procedure for JPCP Thickhness Design in Italy
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements Sigüenza – Spain 1990. October 4 – 5

4. **Michael I. Darter:** Concrete Slab VS Beam Fatigue Models
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements 1990.

5. **VEVERKA V.:** The Belgian Road Research Center's Design Procedure for Concrete Pavements
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

6. **Packard R. G., Tayabji S. D.:** New PCA Thickness Design Pocedure for Concrete Highway and Street Pavements
3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Prudue 1985

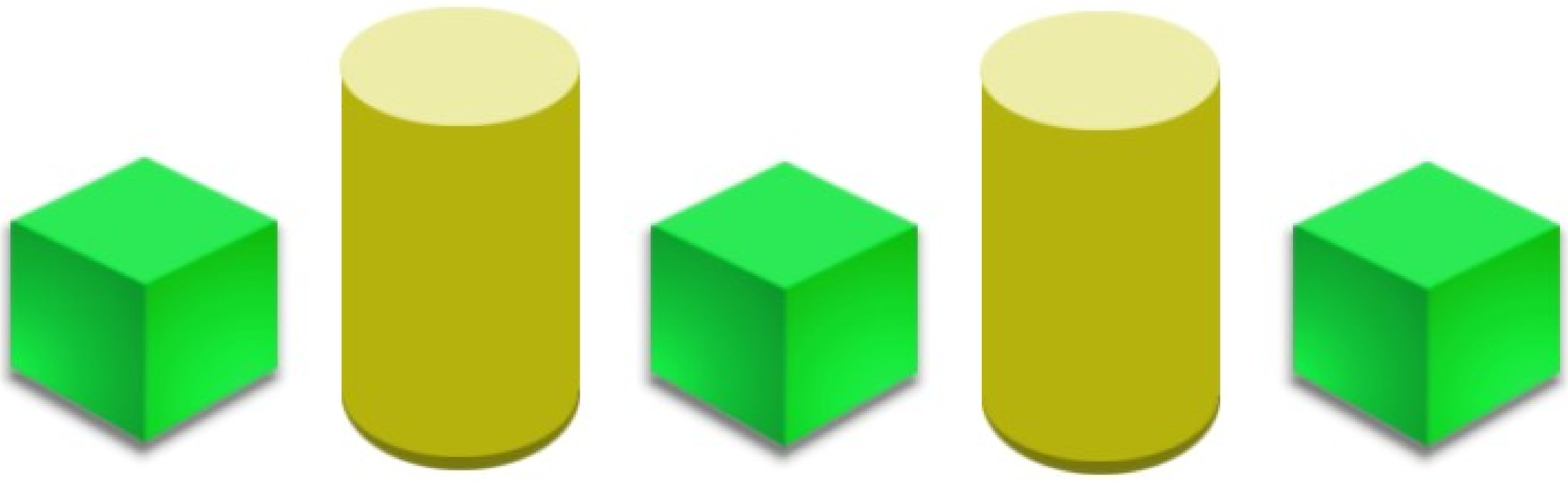
7. **S. IWAMA, T. FKUDA:** Design Method and Researches of Concrete Pavements in Japan
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

8. **Örjan Petersson:** Swedish Design Method for Jointed Concrete Pavements.
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements Sigüenza – Spain 1990. October 4 - 5

9. **V. Faraggi - C. Jofre - C. Kraemer:** Combined Effect of Traffic Loads and ThermalGradients on Concrete Pavement Design
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

10. **Zukang Yao:** Structural Design of Concrete Pavements in China
Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation
April 23-25, 1985 Prudue University West Lafayette, Indiana USA

11. **H. E. van der Most – M. Leewis:** Design of Concrete Pavements
5th international Symposium on Concrete Roads Aachen 2 – 4 June 1986.

12. **H. A. W. Cornelissen - M. Leewis:** Fatigue experiments for the Design of Plain Concrete Pavements
Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements 1986. Epen – The Netherlands

13. **L. J. M. Houben:** Two Dimencional Finite Element analysis of Unreinforced Concrete Pavements
2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements
Sigüenza – Spain 4 – 5 October 1990